INFORME ESPECIAL: LOS NIÑOS Y LA GUERRA

INVESTIGACION y CIENCIA

AGOSTO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Nacimiento de la electrónica molecular

Redes intracelulares

Brotes de formación estelar

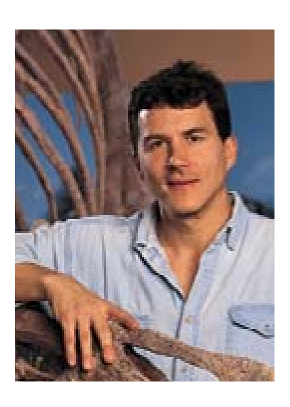
Conquista española y declive de la población india





Agosto de 2000 Número 287

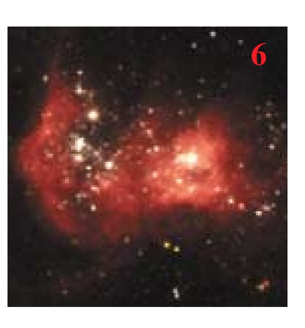
SECCIONES

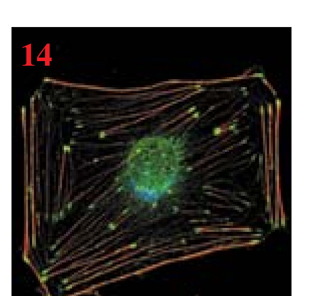






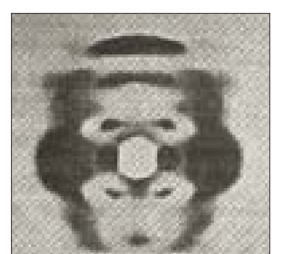


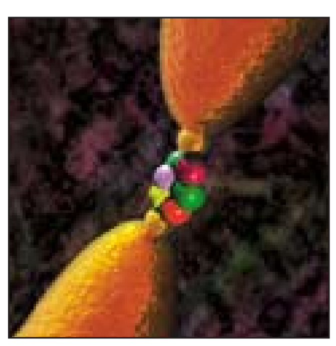




Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES





Portada: Mark A. Reed

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Alfred T. Kamajian; AURA/NOAO/NSF
8-9	nasa/Space Telescope Science Institute; CFHT; David I. Méndez y César Esteban
10-11	NASA/STScI; J. L. Turner; Zareh Gorjian y Varoujan Gorjian *NASA*
14-15	Bryan Christie
16-17	Bryan Christie (*arriba*); Julie Forman-Kay y Tony Pawson (*abajo*)
18	Bryan Christie
19	Bettmann/Corbis
20	Bryan Christie (*ilustración*); Manfred Kage (*fotografía*); Lorene Langeberg (*micrografía*)
21	Lorene Langeberg
23-29	Pour La Science
42	John White
43	Jacques Le Moyne de *Brevis Narratio* (1591)
44	Edward Jonas y The Florida Division of Historical Resources (*pintura*), Roberto Osti (*mapa*); Bryan Christie (*gráfico*)
45	Roberto Osti (*dibujos*); Mark Teaford (microdesgaste dentario); Barry Stark (osteoartritis); Michael Schultz (anemia); Scott W. Simpson (líneas de Retzius) y Mark C. Griffin (infección)
46	Roberto Osti
47	Jacques Le Moyne de *Brevis Narratio* (1591)
48-53	Sergio D. J. Pena y Fabrício R. Santos
56-57	Mark A. Reed
58-59	Diseño de Jared Schneidman
60	Mark A. Reed (*arriba*), Diseño de Jared Schneidman (*gráfica*)
62	Diseño de Jared Schneidman (*ilustraciones*); Paul S. Weiss (*micrografía*)
63	Diseño de Jared Schneidman
64-65	Laurie Grace; fuente: Arms Availability and the Situation of Civilians in Armed Conflict", ICRC 1999 Report
66-67	Laurie Grace
68	Laurie Grace; fuente: "Manufacturing Trends: Going to the Source." Pete Abel en *Running Guns*, dirigido por Lora Lumpe (Zed, London, 2000)
69	Richard Emblin *Black Star*
70	Laurie Grace
71	Enric Marti *AP Photo*
72-73	Laurie Grace
75	Ricardo Mazalan *AP Photo*
76	Apichart Weerawong *AP Photo*
78	T. A. Davis *Saba*
79	Laurie Grace; fuente: Case Studies Compiled by Swedish Save the Children
80-83	Francisco I. Pugnaire y M.ª José Moro

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Galaxias enanas y brotes de formación estelar*; Esteban Santiago: *Comunicación intracelular*; Germán Delibes: *Los tejidos de los príncipes celtas*; Carlos Lorenzo: *Alimentación y salud de los indígenas en las colonias americanas*; Juan P. Adrados: *Computación molecular*; J. Vilardell: *La plaga de las armas portátiles, Hace, Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Cristóbal Pera: *Heridas invisibles*; Juan Pedro Campos: *Los niños del fusil*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

COMIDA PARA EL MUNDO. «El problema de los alimentos pone al mundo frente a dos peligros. Uno es el problema político del hambre. El sino de dos tercios de la humanidad es una vida entera de desnutrición y hambre. Sin embargo, en medio de tan urgentes necesidades persiste la amenaza económica de los excedentes de alimentos generados por la técnica moderna. La abundante producción alimentaria de EE.UU. ya ha empezado a minar su prosperidad. Una Comisión para la Alimentación Mundial, como institución de la ONU, sería responsable de mantener la estabilidad de los precios a escala global y de disponer el uso de los excedentes. —John Boyd-Orr, premio Nobel de la Paz 1949.» [*Nota de la Redacción: nunca llegó a crearse tal Comisión.*]

NAVEGACIÓN ULTRASÓNICA. «Las fotografías de las formas de onda de los sonidos ultrasónicos de los murciélagos, vistas por el osciloscopio de rayos catódicos, muestran que un grito ultrasónico dura sólo del orden de cinco centésimas de segundo. Un sonido audible de tan extrema brevedad se oye como un chasquido sostenido. La frecuencia parece que siempre decae al menos una octava entre el principio y el fin del pulso. Las observaciones demuestran que los murciélagos pueden emplear pulsos ultrasónicos para detectar objetos a unos quince centímetros de distancia. En esas condiciones un eco volvería a los oídos del animal antes de que el pulso hubiera abandonado del todo su boca. Parece más fácil para los murciélagos distinguir entre el eco y el sonido original si ambos difieren en frecuencia, como es el caso.»

LUNES TRISTES. «En un estudio sobre talante laboral realizado en una fábrica británica, dos sociólogos de la Universidad de Birmingham consignan que ‘el ánimo presenta su mínimo los lunes; la asistencia aumenta con la proximidad del día de cobro y el fin de semana’. Al comparar entre varones y mujeres de la misma fábrica, descubrieron un fenómeno sorprendente: el absentismo de los lunes era menor entre las mujeres. Explicación provisional: ‘A las mujeres no les importa tanto volver a la fábrica los lunes, porque los fines de semana no les aporta un verdadero tiempo libre.’»

...cien años

LA AERONAVE DE ZEPPELIN. «El dos de julio será mucho tiempo recordado por los aeronautas como fecha de la primera ascensión de la aeronave, enorme, recién terminada por el conde Zeppelin, oficial de caballería de Wurtemberg. En el lago Constanza se cortó la última amarra a las ocho y tres minutos. El ingenio comenzó a moverse, tratando de elevarse describiendo una elegante curva. Alcanzó una altura de unos 400 metros y recorrió una distancia de cinco kilómetros. Una cosa es muy cierta y es que ninguna embarcación del tipo de la de Zeppelin transportará nunca muchas personas. El enorme gasto en que se incurre al construir tales aeronaves supone un obstáculo grave.»

TRUCAJES ESCÉNICOS. «En las obras de teatro el público lleva tiempo exigiendo mayor realismo. Presentamos una ilustración de una escena del ‘Ben Hur’ que se representa en el Broadway Theater. La escena es la famosa carrera en Antioquía, donde Mesala sale despedido del carro y pierde la carrera. Las ruedas del carro no se apoyan en el piso del escenario, sino que son accionadas por un pequeño motor eléctrico escondido en la carrocería. El carro de Mesala está preparado para que, en el momento crítico en que el carro de Ben Hur lo golpea, unos potentes resortes situados en el eje lancen hacia afuera las ruedas y la carrocería caiga sobre una horquilla provista de resortes.»



El carro trucado en escena: Ben Hur, año 1900

DEMANDA DE HIELO. «El hábito del hielo progresa rápidamente en Gran Bretaña, debido a la incesante petición de hielo en hoteles y locales públicos por parte de miles de viajeros norteamericanos. El consumo crecería si lo distribuyeran empresas normales, pero es un negocio en manos de los pescaderos. Una gran parte se importa de Noruega y se fabrica una cantidad considerable.»

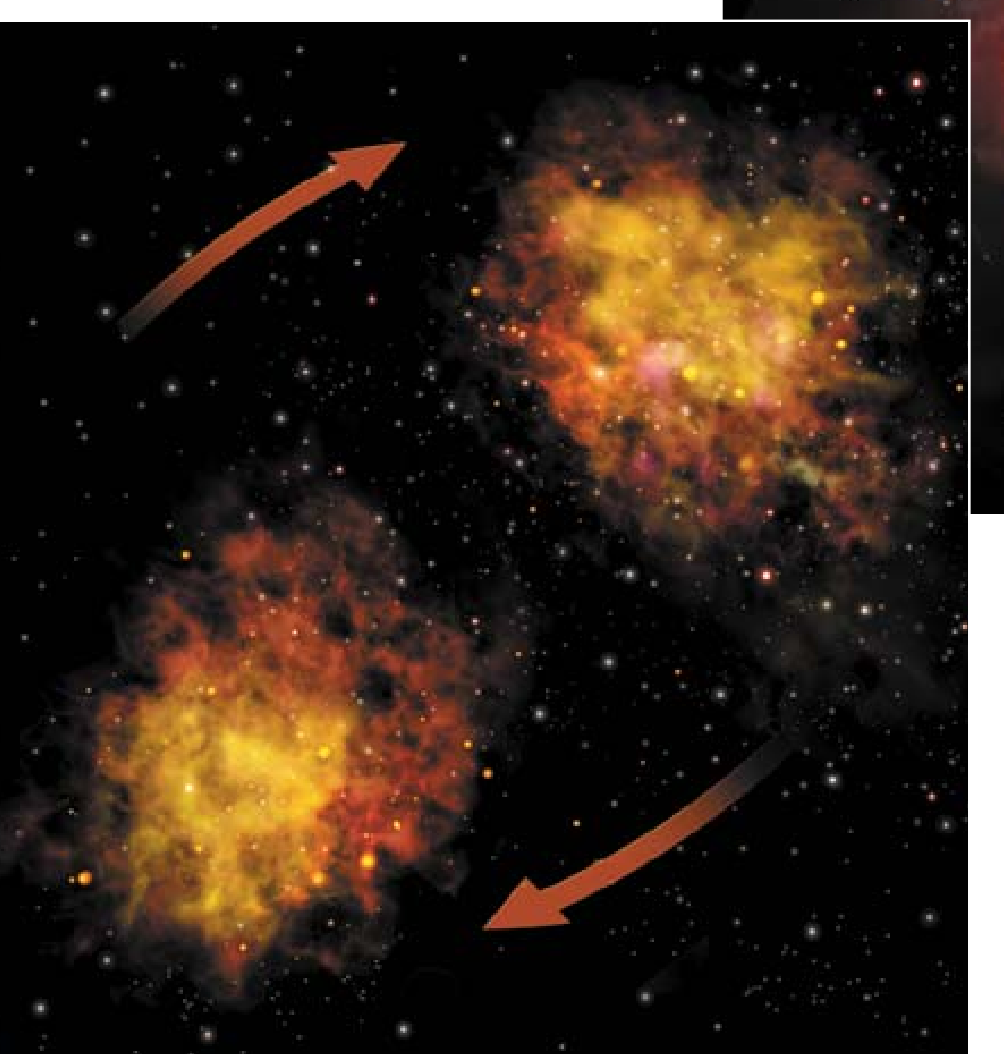
...ciento cincuenta años

TORMENTA DE FUEGO. «Un corresponsal del *Philadelphia Ledger* corrobora la teoría del profesor Espy según la cual un incendio de gran magnitud crearía, por culpa de una rápida rarefacción de la atmósfera, una corriente ascendente, que necesariamente succionaría la atmósfera inmediata y cercana a la superficie. A propósito de un reciente incendio desatado en Filadelfia escribe: ‘Hasta las nueve de la mañana, el intenso viento del sureste arrastraba chispas de fuego hasta los edificios vecinos, y parecía como si fuera a devorar toda la parte norte de la ciudad. A las diez y media observé que las chispas ascendían más verticalmente y hasta una altura mayor, muchas moviéndose en espiral. Comprendí enseguida que el fuego seguía un circuito y descubrí que el viento soplaba hacia adentro procedente de todas partes.’» [*Nota de la Redacción: La expresión para designar este efecto, “tormenta de fuego”, se acuñó en 1945.*]

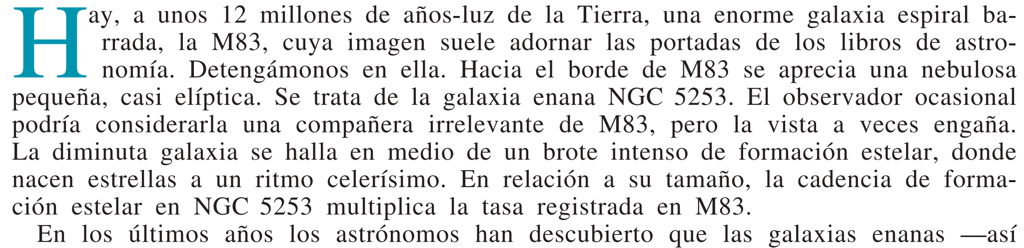
Galaxias enanas y brotes de formación estelar

En esas galaxias minúsculas se producen brotes espectaculares de formación de nuevas estrellas. A través de ellos los astrónomos se adentran en la historia primitiva del universo

Sara C. Beck



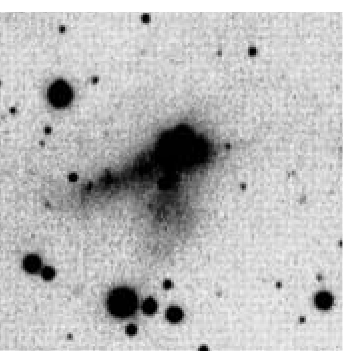
1. UNA FUSION GALACTICA es la desencadenante del nacimiento de nuevas estrellas en esta creación artística de la evolución de la galaxia enana II Zw 40 con brotes de formación estelar. En la primera fase (*izquierda*), dos galaxias enanas que alojan estrellas rojas y añosas y nubes de gas atómico (*color amarillo*) se aproximan por atracción gravitatoria para terminar orbitando una alrededor de la otra. A medida que se van acercando, las fuerzas de marea provocan la extracción de estrellas y gas (*arriba*); comienzan a aparecer grupos de jóvenes estrellas azules. En la fase final (*página contigua, arriba*) se obtiene una galaxia fusionada única, tal y como se aprecia en las imágenes de los telescopios (*derecha*).



Hay, a unos 12 millones de años-luz de la Tierra, una enorme galaxia espiral barrada, la M83, cuya imagen suele adornar las portadas de los libros de astronomía. Detengámonos en ella. Hacia el borde de M83 se aprecia una nebulosa pequeña, casi elíptica. Se trata de la galaxia enana NGC 5253. El observador ocasional podría considerarla una compañera irrelevante de M83, pero la vista a veces engaña. La diminuta galaxia se halla en medio de un brote intenso de formación estelar, donde nacen estrellas a un ritmo celerísimo. En relación a su tamaño, la cadencia de formación estelar en NGC 5253 multiplica la tasa registrada en M83.

En los últimos años los astrónomos han descubierto que las galaxias enanas —así NGC 5253— abundan mucho más de lo que se venía suponiendo. Y por decirlo todo, difieren no poco de sus primas mayores: durante miles de millones de años permanecen en estado latente, para explotar luego en breves pulsos violentos de formación estelar. Los brotes de nuevas estrellas se dan también en las grandes galaxias, pero la radiación procedente de ellos queda a menudo velada por otras emisiones galácticas; sólo de los brotes de las galaxias enanas los investigadores extraen información clara de fenómenos tan intrigantes. De esas galaxias pueden también obtenerse pistas sobre la historia temprana del universo, puesto que son vestigios de tiempos muy antiguos y constan de material que apenas ha cambiado desde la gran explosión.

¿Qué es lo que origina los brotes de formación estelar en las galaxias enanas? ¿Por qué revisten tanto interés para los astrónomos? Para responder a tales cuestiones, se

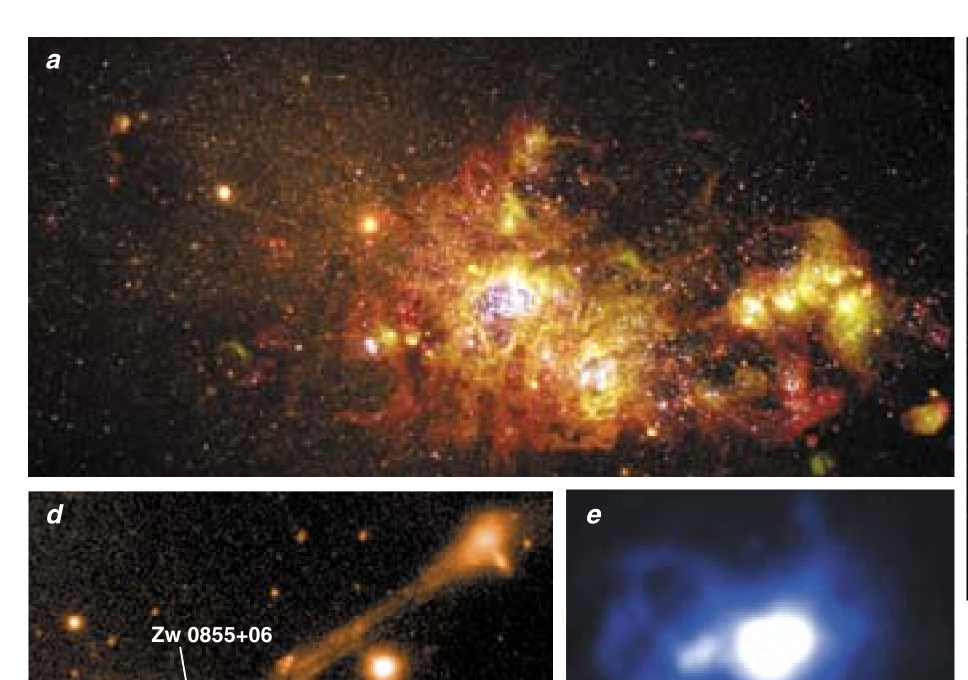


hace obligado revisar los mecanismos del nacimiento de las estrellas. Se sabe que esos astros se han estado formando a lo largo de la vida entera del universo, o casi. Nuestra propia galaxia, la inmensa espiral llamada Vía Láctea, contiene al menos 100.000 millones de estrellas. La formación estelar en la Vía Láctea es un proceso lento y continuo que involucra la contracción de grandes nubes de gas interestelar y polvo. Cada año, en promedio, alrededor de una masa solar de gas y polvo (esto es, una cantidad similar a la masa de nuestro Sol) se convierte en nuevas estrellas.

Por el contrario, un brote de formación estelar implica un período de tiempo relativamente breve —de un millón a 20 millones de años— durante el cual se acelera intensamente el ritmo de nacimiento de estrellas. Los astrónomos han observado galaxias con un ritmo 100 veces superior al de la Vía Láctea. Sabemos que este proceso debe ser de corta duración, pues si se mantuviera durante centenares de millones de años la galaxia consumiría el contenido de gas del que las estrellas están hechas.

Al intensificarse el ritmo de formación estelar se produce una subida drástica del brillo de la galaxia. Por ser breves los tiempos en que aparecen brotes de formación, están dominados por la radiación de las estrellas jóvenes y calientes, cuya masa multiplica al menos por 20 la solar y cuya vida dura sólo unos millones de años. Estas estrellas, que brillan decenas de miles de veces más que el Sol, calientan y ionizan las nubes densas de gas y polvo donde se originaron. Las nubes absorben la luz visible y ultravioleta de las estrellas para emitir energía en radio e infrarrojo. Un brote intenso de formación estelar puede brillar como un cuásar, el objeto más luminoso del universo. La luz procedente del brote se concentra en los intervalos de radio e infrarrojo del espectro; por ello no pudo conocerse y empezar a investigarse hasta hace 20 años, cuando los nuevos telescopios y satélites artificiales permitieron la observación en tales longitudes de onda.

SARA C. BECK, doctorada por la Universidad de California en Berkeley, enseña física y astronomía en la de Tel Aviv. Para investigar la formación de estrellas en nuestra galaxia y otras galaxias, se sirve de imágenes y espectros en el infrarrojo, radio y ondas milimétricas.



Muchos astrónomos creen que los brotes de formación de estrellas desempeñan un papel crucial en la evolución galáctica y en la creación de cúmulos estelares. De ahí el interés por desentrañar los desencadenantes de estos episodios repentinos, cómo proceden y qué es lo que los apaga. Se trata de cuestiones que podrían hallar más fácil respuesta en el ámbito de las galaxias enanas, con sus 100 millones de estrellas o algo menos, que en las grandes espirales, como la Vía Láctea y M83.

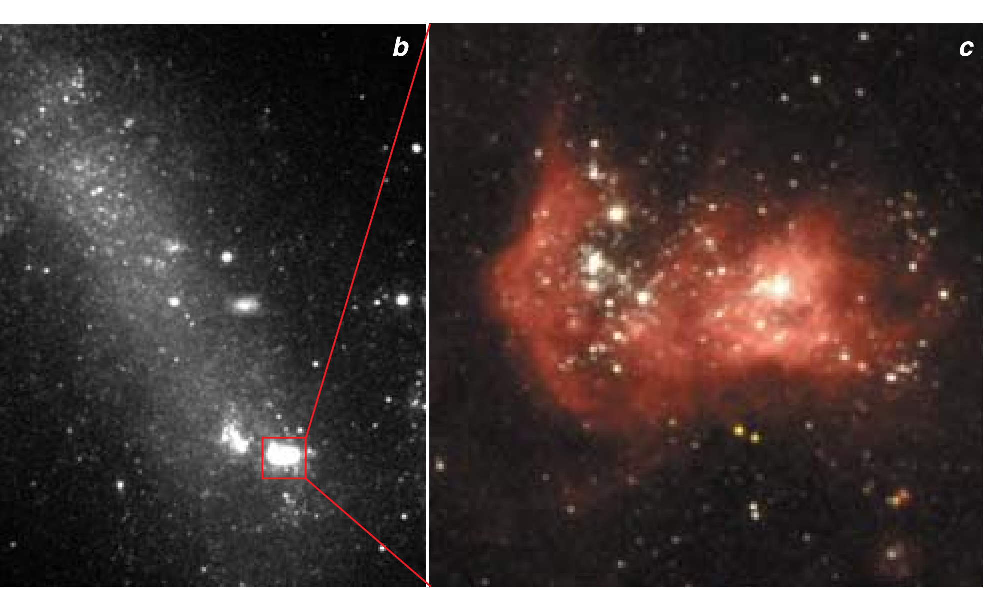
Un diluvio de enanas

La investigación ha tardado en prestar atención a las galaxias enanas porque la mayoría de estos objetos son débiles. Las dos enanas mejor conocidas, la Gran Nube y la Pequeña Nube de Magallanes, parecen más brillantes debido a su proximidad: se encuentran a menos de 300.000 años-luz de nuestra galaxia. Ninguna otra enana es visible para el ojo humano. Pero los nuevos telescopios y detectores, así como las búsquedas a gran escala en el cielo, nos han revelado que abundan más que las galaxias de mayor tamaño. El Grupo Local, el cúmulo galáctico que incluye la nuestra, contiene (en el último cómputo) dos espirales —la Vía Láctea y Andrómeda— y alrededor de 40 enanas. A buen seguro, tal relación numérica predomina en el universo más cercano.

Por razón de su forma algunas de las galaxias enanas se denominan enanas elípticas; las más pequeñas y débiles de éstas se llaman galaxias enanas esferoidales. Pero la mayoría de las enanas carecen de estructura o forma simple; son irregulares.

Las galaxias enanas no son versiones a menor escala de las galaxias grandes. Su evolución está dirigida por mecanismos distintos. Las galaxias espirales cuentan con nubes gigantes de hidrógeno molecular, helio y polvo, prestas a formar estrellas. Se mantiene la estructura de brazos espirales merced a las ondas de densidad, que constituyen el mecanismo inicial de la formación de estrellas al comprimir las nubes moleculares que atraviesan. Como resultado, las galaxias espirales nunca permanecen completamente latentes; siempre presentan estrellas de formación reciente.

Las galaxias enanas, por contra, contienen escaso hidrógeno molecular pero abundante hidrógeno atómico, es decir, átomos de hidrógeno que se encuentran libres, no ligados en moléculas diatómicas. En una galaxia enana típica, la masa almacenada en nubes de hidrógeno atómico decuplica la masa de las estrellas. Estas nubes no alcanzan la densidad de las nubes de hidrógeno molecu-



2. LAS GALAXIAS ENANAS CON BROTES DE FORMACION ESTELAR como NGC 4214 (*a*) contienen grupos de estrellas azules y jóvenes rodeados de nubes de gas brillante. Otras aglomeraciones de estos brotes se observan también en la enana NGC 2366 (*b*); una imagen de ampliación tomada con el telescopio espacial Hubble muestra un cúmulo denso de estrellas masivas inmersas en una nube de gas (*c*). El brote de formación de estrellas en la galaxia enana Zw 0855+06 (*d*) se originó, cabe pensar, a raíz de una aproximación hacia otra galaxia enana, hecho que tendió el puente de estrellas entre las galaxias. Henize 2-10 (*e*) presenta una cola de marea de gas, signo de que esta galaxia absorbió otra de menor tamaño.

lar, por lo que es menos probable que experimenten una contracción gravitatoria para producir estrellas. Es más, las galaxias enanas no cuentan con ondas de densidad, ni con cualquier otro movimiento organizado de gas que provoque la contracción de una nube. Así que las enanas permanecen la mayor parte de su tiempo en un estado quiescente, fase durante la cual todas sus estrellas son débiles, rojas y viejas. Sólo las enanas con brotes de formación estelar tienen estrellas azules, brillantes y calientes, que indican procesos recientes de nacimiento de estrellas.

Las pruebas de largos períodos de quiescencia en las galaxias enanas se obtienen del análisis de su contenido químico. La formación estelar modifica la composición metálica de una galaxia. En efecto, cuando las estrellas de mayor masa arriban al final de sus días explotan en violentas supernovas, enriqueciendo el medio galáctico con elementos pesados formados en las reacciones termonucleares de la estrella. Sin embargo, si no se generan nuevas estrellas, la galaxia permanecerá químicamente inalterada, sin evolucionar. Podemos conocer la historia de una galaxia a través de su abundancia de metales, como los astrónomos designan a todos los elementos químicos que no son hidrógeno y helio (para enojo de los químicos). Cuanto menor sea el contenido metálico, menos evolucionada será la galaxia.

Las concentraciones de metales en las galaxias enanas se hallan en el rango del 2 % al 30 % del contenido metálico en la vecindad del Sol, con el pico de la distribución localizado alrededor del 10 %. Sólo unas pocas enanas con brotes muy activos presentan una composición química equiparable a la de las galaxias espirales. El estado poco evolucionado de las galaxias enanas mueve a pensar en la posibilidad de encontrar una que sea básicamente primordial, inalterada desde la gran explosión. Las galaxias que muestran las menores abundancias en metales detectadas hasta la fecha —las enanas I Zw 18 y SBS 0335-052— no parecen primordiales: cuentan con varias generaciones de estrellas. Mientras prosigue la búsqueda, los cosmólogos estudian este tipo de galaxias explorando las pistas que puedan conducir al conocimiento de cómo se formaron las primeras generaciones de estrellas.

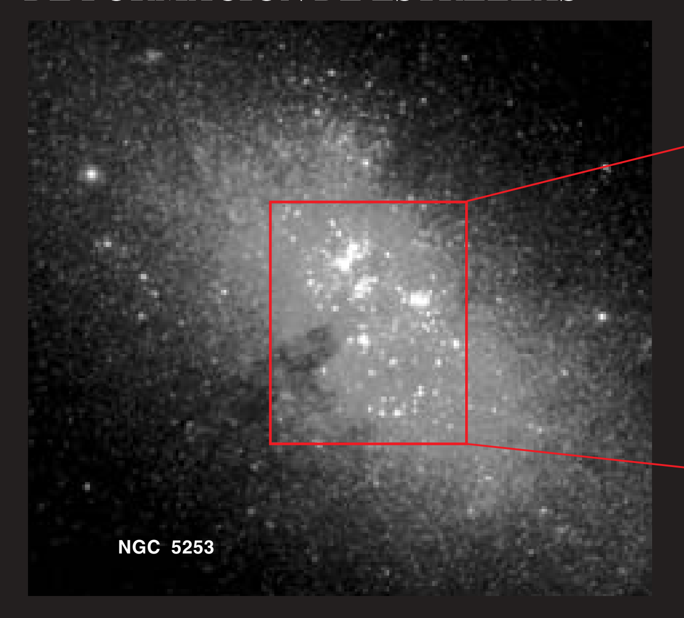
Las galaxias enanas con episodios de formación estelar en su haber presentan una apariencia única. Contienen aglomerados o grumos de estrellas jóvenes, azules y calientes dentro de una envoltura mayor y débil de estrellas viejas, rojas y frías. Las enanas con brotes se caracterizan por su brillo. Durante la fase de intensa formación estelar la galaxia enana puede brillar como una espiral, mientras que en su estado latente la luminosidad de una enana de similar tamaño habría caído hasta un exiguo 1 %, si no más débil. Toda esta actividad acontece en una zona restringida: los diámetros de los grupos de brotes oscilan entre unos pocos cientos hasta 1000 años-luz. Las propias galaxias abarcan, por norma, menos de 6000 años-luz de diámetro. Cada grupo de brotes puede constar desde cientos hasta decenas de miles de estrellas brillantes de tipos espectrales O y B. En una misma enana podría haber varios grupos de brotes, no necesariamente confinados al centro de la galaxia.

Estallido de estrellas

A diferencia de lo que se da en la Vía Láctea y en otras galaxias, las enanas con brotes de formación estelar no ofrecen una distribución de estrellas de todas las edades; sólo parecen contener aglomerados de estrellas muy jóvenes y una capa envolvente de estrellas miles de millones de años más viejas. Los astrónomos estiman las edades de las estrellas que hay en estas galaxias mediante el estudio de las distintas fases de la evolución estelar. Es posible que el mejor indicador de edades para las estrellas jóvenes corresponda a la fase de Wolf-Rayet; a ésta llegan entre los 2 y 10 millones de años las estrellas de mayor masa (más de 25 veces superior a la solar). Durante dicho estadio, las estrellas expulsan la mayor parte de su masa inicial a una velocidad de miles de kilómetros por segundo. Las líneas de emisión de los iones que se mueven raudos por ese material se ensanchan en virtud del efecto Doppler; no aparecen en forma de rayas estrechas en el espectro, sino que se extienden hacia los extremos rojo y azul. Cuando los astrónomos observan ese ensanchamiento espectral de un brote de formación estelar, saben que contiene un número significante de estrellas Wolf-Rayet cuya edad no supera los 10 millones de años.

En las galaxias de gran tamaño los grupos de brotes de formación estelar se superponen, a menudo, sobre el brillante núcleo galáctico o sobre uno de los brazos espirales, con la obstrucción consiguiente de las ob-

EVOLUCION DE UN BROTE DE FORMACION DE ESTRELLAS





3. EL BROTE JOVEN DE FORMACION ESTELAR observado en el centro de la galaxia enana NGC 5253 se desencadenó al absorber ésta una nube de gas intergaláctico. La parte más joven del brote, con una edad inferior al millón de años, se detecta sólo en imágenes en radio e infrarrojo (*arriba a la derecha*), ya que las estrellas ahí contenidas se encuentran todavía enterradas dentro de la nebulosidad en la que nacieron. Transcurridos unos 10 millones de años, los vientos estelares expulsarán el gas circundante, como ha imaginado el artista (*página contigua, a la izquierda*); después de varios miles de millones de años, el brote evolucionará hacia un cúmulo globular, quizá parecido a NGC 6093 en nuestra propia galaxia (*página contigua, a la derecha*).

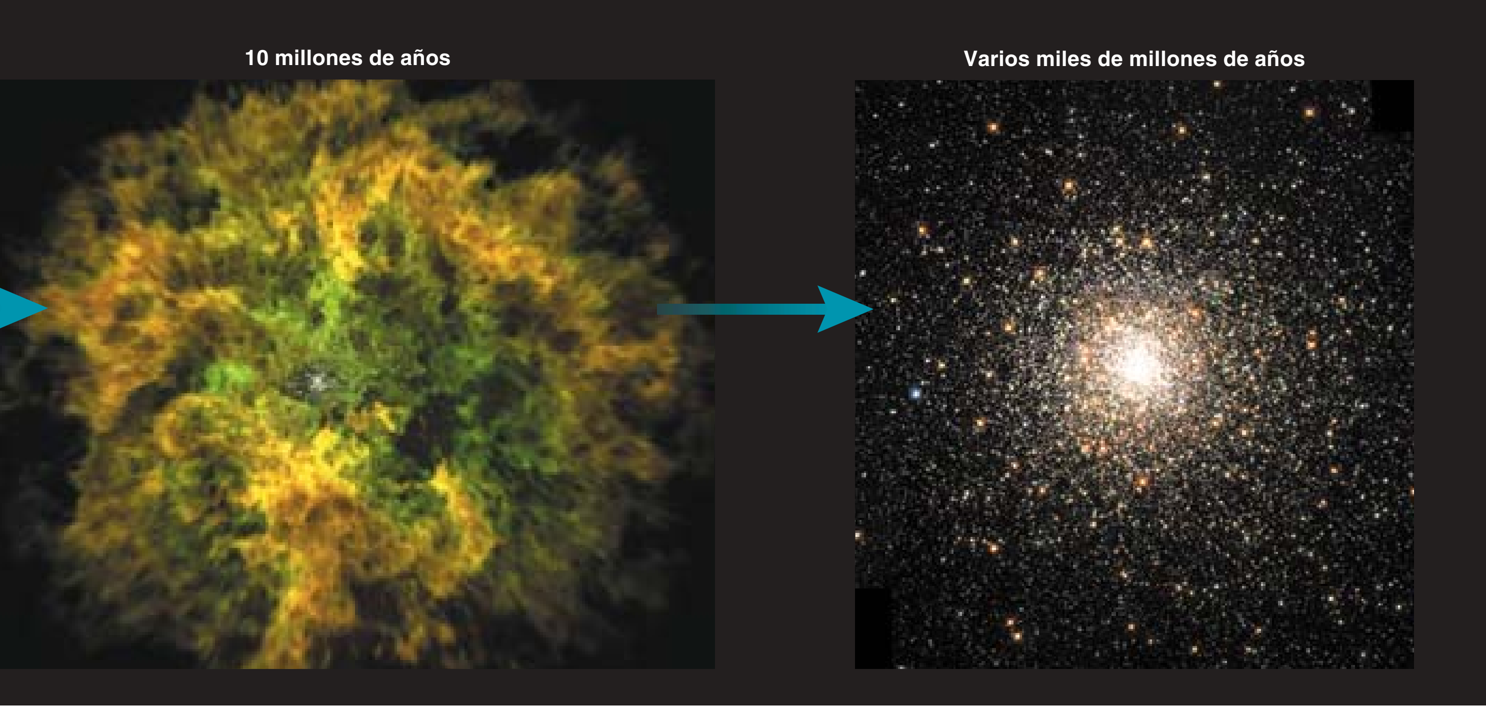
servaciones. Es más, la radiación originada en el proceso continuo de nacimiento de estrellas en la galaxia se confunde con las emisiones procedentes de los brotes. Este problema se agrava en la región radio del espectro electromagnético. Como antes expusimos, las estrellas jóvenes de los brotes ionizan las nubes circundantes de gas. Estas producen emisiones en radio caracterizadas por un espectro térmico de energías: la intensidad de la emisión varía distintamente con la frecuencia. Ahora bien, cuando las estrellas masivas pasan a la fase de supernova, los remanentes de la explosión emiten ondas de radio cuyo espectro no es térmico. El espectro observado en radio procedente de una galaxia de gran tamaño resulta de la combinación de la radiación térmica de la generación actual de estrellas muy masivas y de la luz no térmica de generaciones estelares precedentes. La radiación no térmica, pues, puede ser más intensa y de mayor duración que la radiación térmica. Esa es la razón de que, en una galaxia de gran tamaño, la luz emitida por los brotes de formación de estrellas quede velada por otro tipo de emisiones.

Las galaxias enanas, sin embargo, no presentan una historia continua del nacimiento de las estrellas. Los cúmulos de brotes se convierten así en objetivos prestos a la observación por separado. En las galaxias enanas con brotes, por ejemplo NGC 5253 e II Zw 40, se detectan sólo las emisiones térmicas procedentes de las estrellas jóvenes, ya que se ha debilitado la contribución en radio de los brotes anteriores. La ausencia de radiación no térmica sirve de indicador de la edad; implica que ninguna de las estrellas de mayor masa de los brotes ha madurado en supernova y, por ende, la edad del brote debe ser inferior a la edad a la que estas estrellas explotan (unos millones de años). Esta estimación coincide con otras observaciones que apoyan que los brotes de NGC 5253 e II Zw 40 son los más jóvenes identificados hasta la fecha.

Las regiones más jóvenes de los brotes de formación estelar en NGC 5253, rodeados de la nube densa de gas y polvo originaria, no se detectan en el visible. Los estudios realizados en el infrarrojo y en radio muestran que la luz en estos intervalos del espectro electromagnético proviene de una fuente muy pequeña; allí, en una zona de apenas 3 a 6 años-luz de diámetro, coexisten, sospechamos, unas 100.000 estrellas jovencísimas. El contenido en estrellas y el tamaño de la fuente son muy similares a los cúmulos globulares, agrupaciones densas y esféricas de estrellas de la Vía Láctea y de otras galaxias de gran tamaño.

Los cúmulos globulares de la Vía Láctea, sin embargo, cuentan con varios miles de millones de años, por lo menos; de hecho alojan las estrellas más viejas de la galaxia. La conclusión lógica es que nuestra galaxia no ha formado cúmulos globulares en muchos miles de millones de años, o, si lo ha hecho, los cúmulos recién engendrados quedaron desplazados y disgregados por acción gravitatoria conforme trazaban órbitas alrededor del disco. Los brotes de formación estelar en NGC 5253 y otras galaxias enanas podrían haber sido cúmulos globulares en el momento de su nacimiento. De resultar así, nos habrán de revelar aspectos hasta ahora desconocidos de la historia de nuestra galaxia.

Se debe recordar, no obstante, que lo que puede ser verdad para las enanas no siempre resulta cierto en las galaxias de mayor tamaño. Divergencia que se produce, por ejemplo, en la "propagación estelar", el mecanismo en cuya virtud el nacimiento de las estrellas en una parte de la galaxia puede conducir a la formación estelar en otras regiones. La aparente aleatoriedad de la distribución de los grupos de brotes en las enanas lleva asociada la pregunta de cómo



se extiende la formación de estrellas a través de una galaxia que no tiene brazos espirales ni ningún otro movimiento organizado del gas. De acuerdo con el modelo de la "formación estocástica y de la propia propagación de estrellas", la explicación más aceptada, un brote en una región cualquiera de la galaxia desencadena brotes secundarios en otras zonas. Las estrellas jóvenes de mayor masa en el primer centro de actividad perturban el gas circundante de regiones próximas con sus vientos estelares, ionización y otros procesos energéticos. El gas se contrae entonces y comienza su propio brote de nacimiento. Este mecanismo continúa hasta que no queda más gas cercano que pueda verse afectado por la presencia de estrellas masivas. Ahora bien, aunque este modelo da cuenta del progreso de la formación estelar en las galaxias enanas, resulta inoperante para las galaxias espirales. Además, deja abierta la cuestión de cuál fue el evento que originó el brote inicial.

El conocimiento de los desencadenantes de los brotes de formación estelar en las galaxias de gran tamaño y en las enanas constituye un objetivo central de la investigación astrofísica. Hasta la fecha se han esbozado respuestas diferentes para galaxias distintas. En el caso de las enanas mejor estudiadas, se hallarían interactuando, fundiéndose con otros objetos astronómicos o absorbiéndolos. Así, a II Zw 40 se la denomina "figura en X" porque está formada por dos galaxias enanas fundiéndose. Henize 2-10 es una galaxia enana de tamaño bastante grande que presenta un brote maduro de unos 10 millones de años. Probablemente, esta galaxia se apropió de otra bastante menor hace ya unos 100 millones de años. La galaxia menor se halla ahora absorbida del todo, con la salvedad de una cola fina de gas observable en los alrededores de Henize 2-10. La enana Zw 0855+06 con brotes activos está interactuando con otra enana (sin brotes) muy próxima, lo suficiente para provocar perturbaciones e inestabilidades en la galaxia. Los ejemplos abundan.

Encuentros de enanas

Las aproximaciones entre galaxias instan también brotes de formación estelar en las de gran tamaño. Ni colisiones ni fusiones de galaxias afectan a las estrellas preexistentes; las estrellas de una galaxia no suelen chocar contra estrellas de otra galaxia, habida cuenta del inmenso espacio vacío que media entre ellas, incluso en zonas densas. Pero las interacciones sí afectan al gas de las galaxias; las nubes de gas experimentan choques, compresiones e inestabilidades gravitatorias que las obliga a fragmentarse, contraerse y formar estrellas. Estos procesos operan por igual en las galaxias enanas y en los sistemas de mayor tamaño.

Muchas enanas con brotes activos no están interactuando con otras galaxias, sino con sistemas menores y menos luminosos que aquéllas. Pero si las galaxias enanas son ya el pez pequeño del acuario celeste, ¿cuál es el alevín al que se comen? Sostienen algunos que estos sistemas serían nubes de gas atómico (principalmente hidrógeno) cuyas masas oscilaran entre 1 millón y 10 millones de masas solares. Se estima, a este respecto, que NGC 5253 podría haber absorbido una pequeña nube de gas (de apenas 1 millón de masas solares) del espacio intergaláctico. Se han realizado búsquedas exhaustivas de estas nubes en radio para identificar la emisión característica del hidrógeno atómico; del rastreo resultó que las galaxias enanas con brotes activos poseen más nubes de este tipo en sus alrededores que las enanas sin brotes.

La hipótesis según la cual los brotes de formación estelar en las galaxias enanas los provocan las interacciones con otras enanas o con nubes de gas intergaláctico podría explicar por qué dichos pulsos surgen esporádicamente y duran cierto intervalo de tiempo. Pero, ¿qué mecanismos apagan los brotes? La respuesta se esconde en una de las propiedades que caracterizan a las galaxias enanas: muchas de ellas están inmersas en macroestructuras de gas ionizado con forma de conchas, burbujas, halos, horquillas o chimeneas. Estas estructuras son una consecuencia de la vida activa y vigorosa de las estrellas de mayor masa, generadoras de fuertes corrientes de gas. Si alcanzan masa suficiente se convertirán en estrellas Wolf-Rayet para después morir como supernovas. Las envolturas y burbujas de gas observadas en las galaxias enanas son, a buen seguro, residuos de los vientos de las estrellas Wolf-Rayet y de las explosiones de supernovas.

La pérdida violenta de materia constituye una peculiaridad de las estrellas jóvenes de gran masa en general, y no sólo de estas estrellas en las galaxias enanas; por tanto, las burbujas y los filamentos de gas ionizado también se observan en galaxias mayores con brotes. Pero estas estructuras de las galaxias enanas se extienden mucho más allá que en el caso de los sistemas grandes. Por una razón muy simple: la menor masa y gravedad de la galaxia enana posibilita que el gas expulsado alcance distancias mayores y que, en muchos casos, escape incluso del ámbito de la propia galaxia. Los brotes de formación estelar se autofrenan manifiestamente: la actividad energética de las estrellas disgrega el gas interestelar del que depende la formación y lleva el proceso a un paro absoluto. Las estrellas de menor masa originadas en el brote y que no llegan a convertirse en supernovas se integrarán en la envoltura de estrellas débiles y rojas de la galaxia enana. Y la galaxia regresará a su estado latente: ya no habrá más brotes de formación estelar, convirtiéndose en una galaxia enana irregular hasta un próximo encuentro.

Los grandes telescopios ópticos e infrarrojos, en el espacio o en la superficie terrestre, las redes de telescopios que operan en ondas radio y milimétricas, y los satélites que detectan radiación de alta energía, han hecho posible el estudio, hasta ahora sin precedentes, de la formación estelar en las galaxias enanas. Estos sistemas dinámicos permiten abordar fenómenos que no se observan en ninguna otra parte del universo. En las enanas con brotes activos tenemos uno de los mejores ejemplos de casos interesantes confinados en pequeñas regiones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COLISIONES ENTRE GALAXIAS. J. Barnes, L. Hernquist y F. Schweizer en *Investigación y Ciencia*, págs. 14-22; octubre, 1991.

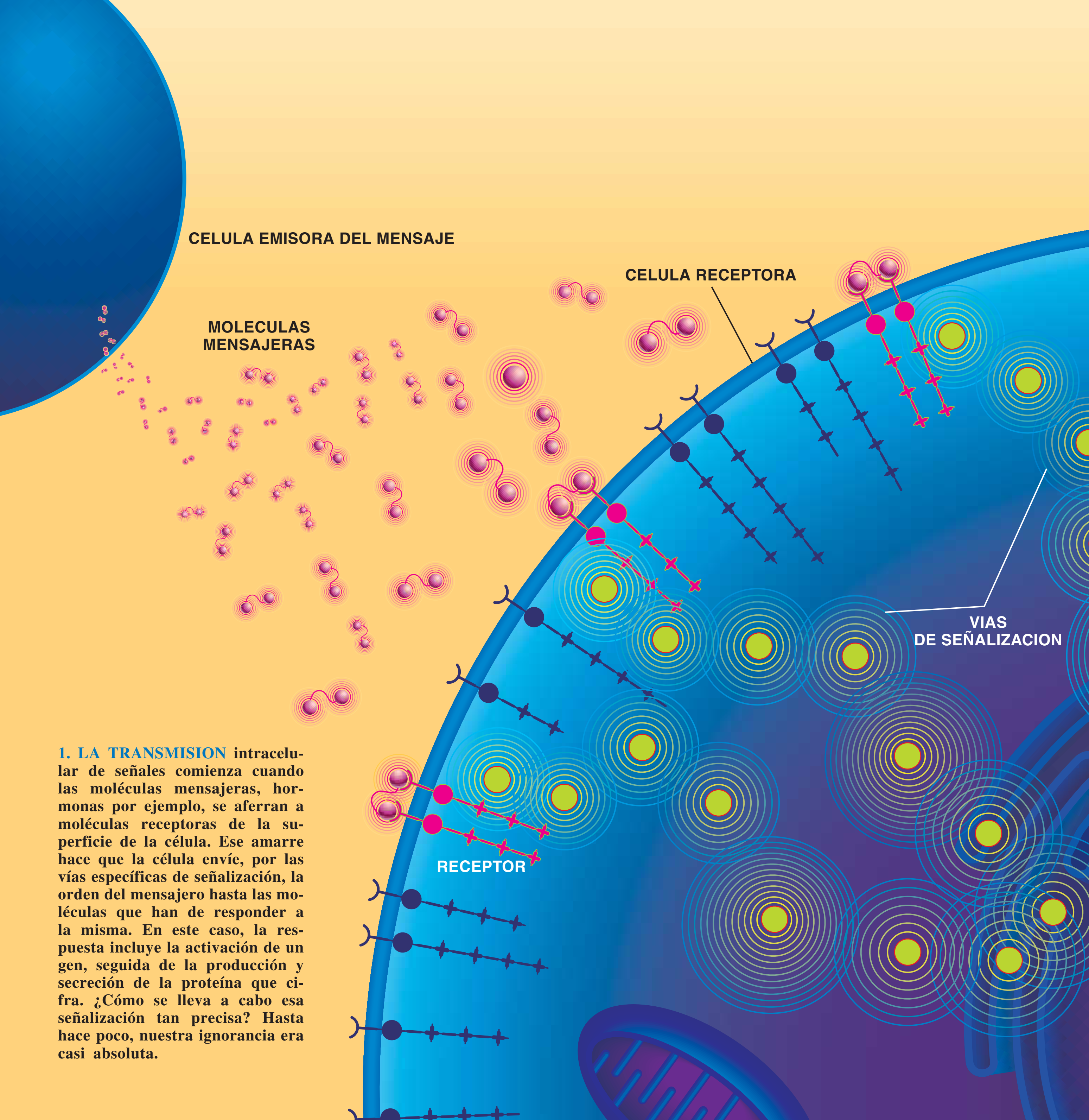
WOLF-RAYET PHENOMENA IN MASSIVE STARS AND STARBURST GALAXIES. Dirigido por Karel A. van der Hucht et al., series IAU, vol. 193. Astronomical Society of the Pacific, 1999.

THE RADIO SUPER NEBULA IN NGC 5253. J. L. Turner, S. C. Beck y P. T. P. Ho en *Astrophisical Journal Letters*, vol. 532, n.º 2, págs. L109-L112; abril, 2000.

Las células de nuestro organismo contienen unas redes de comunicación interna sorprendentes. De la comprensión de la organización de estos circuitos depende la creación de nuevas terapias para muchas enfermedades graves

Comunicación intracelular

John D. Scott y Tony Pawson



1. LA TRANSMISION intracelular de señales comienza cuando las moléculas mensajeras, hormonas por ejemplo, se aferran a moléculas receptoras de la superficie de la célula. Ese amarre hace que la célula envíe, por las vías específicas de señalización, la orden del mensajero hasta las moléculas que han de responder a la misma. En este caso, la respuesta incluye la activación de un gen, seguida de la producción y secreción de la proteína que cifra. ¿Cómo se lleva a cabo esa señalización tan precisa? Hasta hace poco, nuestra ignorancia era casi absoluta.

Cualquiera que conozca el juego del "teléfono" sabe perfectamente que al pasar el mensaje de una persona a otra las palabras se degradan poco a poco y acaban siendo irreconocibles. Sorprende, pues, que las moléculas del interior de nuestras células, que realizan sin cesar su propia versión del teléfono, lo hagan sin que se pierda un ápice del mensaje.

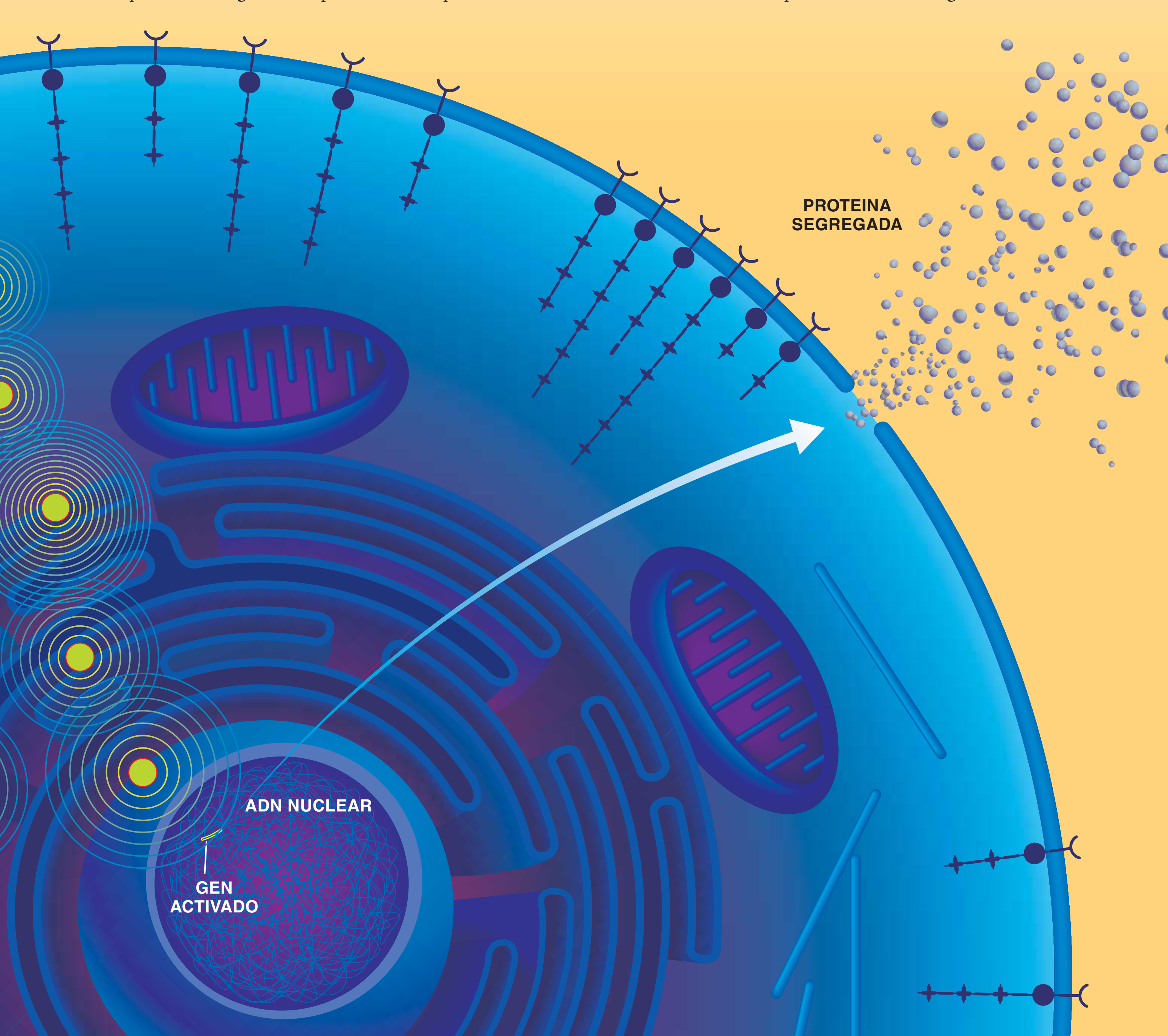
No podríamos vivir sin esa precisa señalización de las células. El organismo opera en buen orden porque existe una fluida comunicación entre sus células. Las del páncreas, por ejemplo, segregan insulina y, con ello, ordenan a las células musculares que capten el azúcar de la sangre y produzcan energía. Las células del sistema inmunitario envían instrucciones a sus parientes cercanos para que ataquen al invasor; las del sistema nervioso emiten mensajes de una zona a otra del cerebro. Esos mensajes reciben la respuesta idónea por la exclusiva razón de que se transmiten correctamente al interior de una célula receptora y las moléculas adecuadas pueden cumplir con fidelidad las órdenes dictadas.

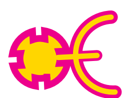
¿Cómo consiguen los circuitos del interior de las células esta transmisión de alta fidelidad? Durante mucho tiempo los biólogos sólo podían dar explicaciones rudimentarias. Pero a lo largo de los últimos 15 años se han realizado avances importantes en el desciframiento del código intracelular. Los nuevos descubrimientos sugieren estrategias radicalmente nuevas para combatir el cáncer, la diabetes y alteraciones del sistema inmunitario, enfermedades que se producen o se exacerban por una comunicación defectuosa en las células.

Afinando la cuestión

Las primeras noticias acerca de la transferencia de información entre las células se remontan a finales de los años cincuenta, cuando Edwin G. Krebs y Edmond H. Fischer, de la Universidad de Washington, y Earl W. Sutherland, Jr., de la Universidad de Vanderbilt, identificaron las primeras moléculas conocidas de transmisión de señales en el citoplasma (sustrato que existe entre el núcleo y la membrana externa de la célula). Los tres recibieron el premio Nobel por sus descubrimientos.

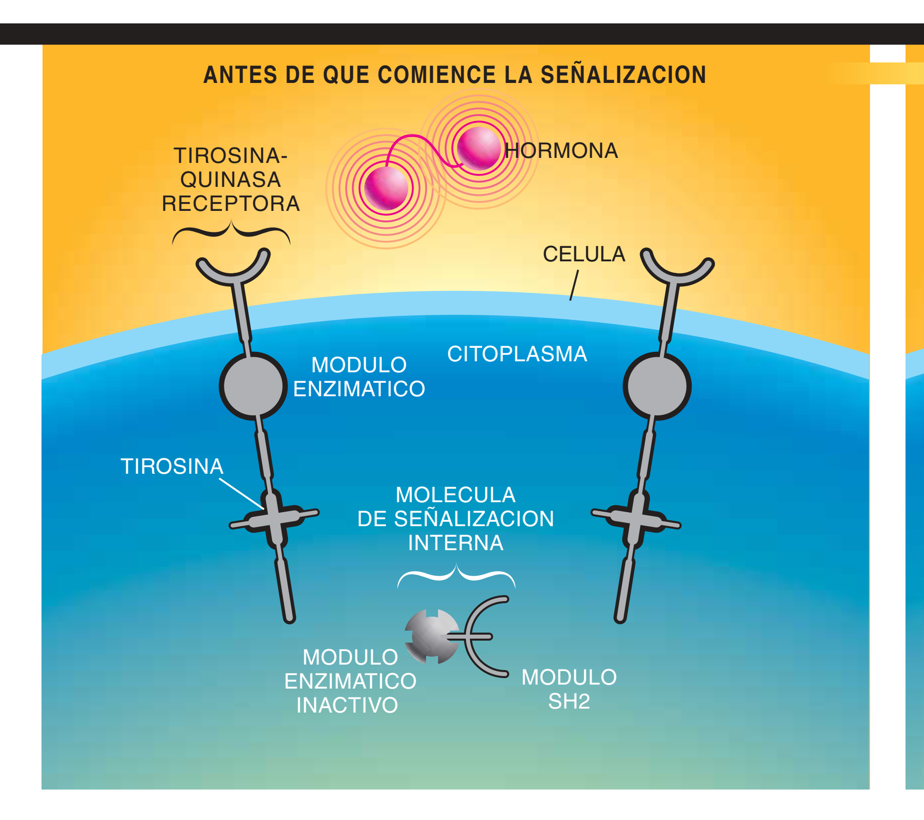
A comienzos de los años ochenta se había avanzado bastante en el conocimiento de los mecanismos de transmisión de señales. Expresado con la imagen de la llave





Señalización modular

Las moléculas que integran los circuitos celulares de señalización son, a menudo, modulares. Sus elementos componentes realizan distintas tareas. A ese descubrimiento se llegó desde el estudio de las tirosinaquinasas receptoras (*con forma de zanco en el primer panel*). Cuando en la superficie celular una hormona se acopla a estas moléculas (*segundo panel*), los receptores se emparejan y agregan fosfatos al aminoácido tirosina de las colas citoplásmicas. Luego, en las tirosinas modificadas se prenden módulos SH2 de ciertas proteínas (*último panel*). A través de esa unión, los módulos enzimáticos "portavoces" recogen la orden del mensajero y la transmiten.



y su cerradura, se sabía ya, por ejemplo, que suele iniciarse con el acoplamiento provisional entre un mensajero responsable de transmitir información de una célula a otra (a menudo una hormona), y un receptor de la célula destinataria. Estos receptores, cuya función evoca la de una antena, transmiten la orden del mensajero a la célula porque se hallan físicamente conectados con el citoplasma. El receptor típico es una proteína, una cadena de aminoácidos plegada. Comprende al menos tres dominios: la región de acoplamiento para una hormona u otro mensajero, el componente que trasciende la membrana externa de la célula y una "cola" que se adentra en el citoplasma. Cuando un mensajero se une a la porción exterior, el enganche de marras induce un cambio en la forma de la cola citoplásmica, que facilita la interacción entre ésta y una o varias moléculas transmisoras de información en el citoplasma. Ese juego de interacciones, a su vez, desencadena cascadas de señales intracelulares ulteriores.

Nadie sabía por qué los comunicados llegaban a su destinatario sin degradarse en el camino. En esos años, representábamos las células a la manera de bolsas hinchadas y rellenas de un caldo citoplásmico que contenía proteínas y orgánulos flotantes (compartimientos ceñidos por membranas, como el núcleo o las mitocondrias). Resultaba difícil atisbar, en semejante medio sin estructurar, de qué modo podría encontrar sistemática y prestamente una molécula mensajera interna su destino preciso y transmitir la orden a los encargados de cumplirla, alojados en las profundidades de la célula.

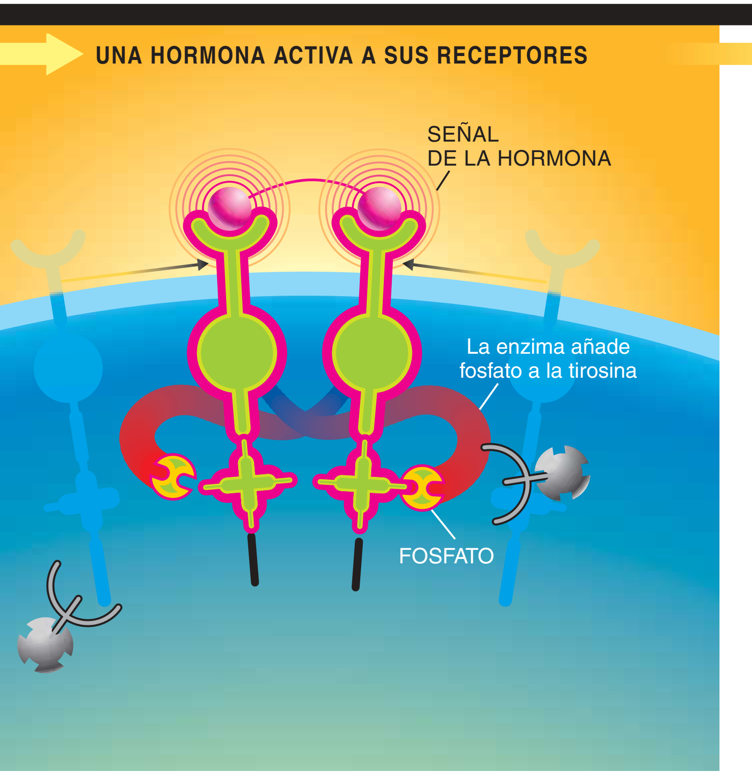
JOHN D. SCOTT y TONY PAWSON colaboran en cuestiones relacionadas con la arquitectura molecular que posibilita la transmisión de señales hormonales y de otro tipo en el interior de las células. Scott se halla adscrito al Instituto Médico Howard Hughes. Pawson dirige el programa de biología molecular y cáncer en el Instituto de Investigación Samuel Lunenfeld del Hospital Mount Sinai en Toronto.

Acoplamiento por bloques

Cuanto ahora conocemos de la cuestión se debe en buena medida a los esfuerzos empeñados en identificar las primeras proteínas citoplásmicas que entraban en contacto con los receptores activados (ligados a mensajeros) en una familia numerosa e importante: las tirosinaquinasas receptoras. En cumplimiento de su misión vital, estos receptores transmiten las órdenes de muchas hormonas que regulan la replicación celular, la especialización o el metabolismo. En cuanto enzimas quinasas, añaden grupos fosfato ("fosforilan") a determinados aminoácidos de una cadena proteica. Y, como ha demostrado Tony R. Hunter, del Instituto Salk de Estudios Biológicos de La Jolla, colocan específicamente fosfatos en el aminoácido tirosina.

En los años ochenta, Joseph Schlessinger, de la Universidad de Nueva York, y otros pusieron de manifiesto que la unión de las hormonas a las tirosinaquinasas receptoras, en la superficie celular, determinaba que las moléculas receptoras se asociaran en parejas y agregaran fosfatos a las tirosinas de las respectivas colas citoplásmicas. ¿Qué sucedía entonces? El grupo de Pawson, coautor de este artículo, se propuso averiguarlo. Halló que los receptores modificados interaccionaban directamente con proteínas dotadas de un dominio SH2. Por "dominio" o "módulo" se entiende una secuencia bastante corta, de unos 100 aminoácidos, que adopta una estructura tridimensional definida dentro de una proteína.

Creíase por entonces que los mensajes se transmitían en el interior celular a través de reacciones enzimáticas, sobre todo. En tales reacciones, una molécula modifica a una segunda sin establecer un enlace firme con ella ni sufrir en su estructura alteración alguna. Mas, para sorpresa de los investigadores, los receptores fos-



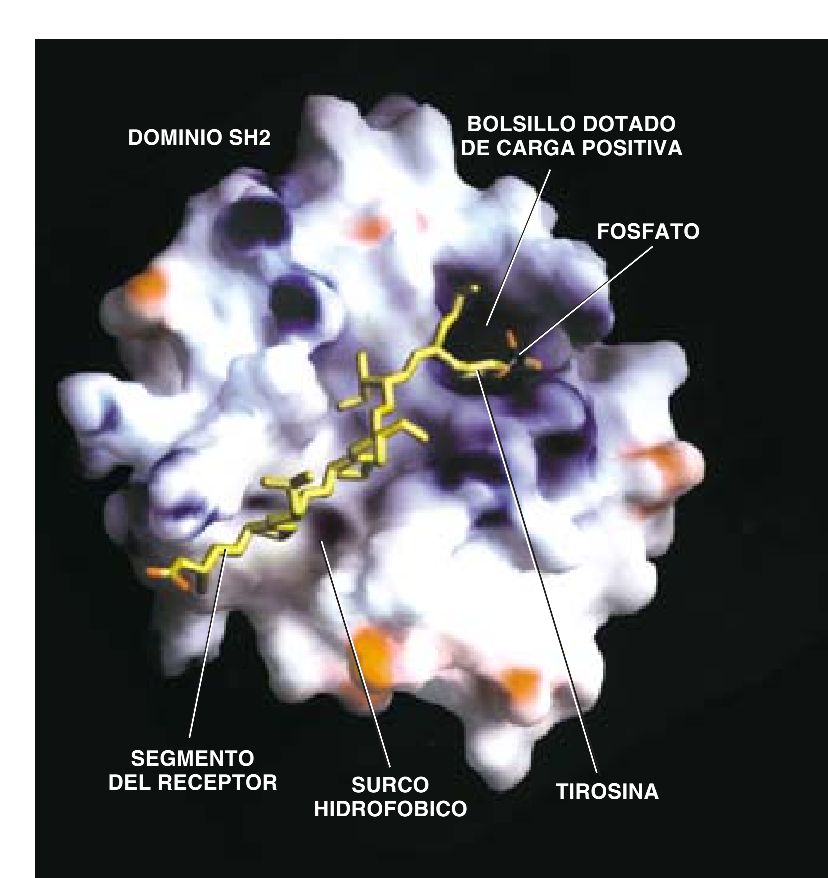


forilados no alteraban obligadamente la química de las proteínas portadoras de dominios SH2. Antes bien, muchas se limitaban a inducir que los dominios SH2 se encadenaran a las tirosinas con fosfato; diríase que los dominios SH2 y las tirosinas eran una suerte de broches, macho y hembra, que encajaban entre sí.

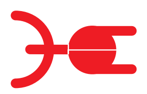
Llegamos a mediados de los noventa. Los grupos de Pawson, Hidesaburo Hanafusa, de la Universidad de Rockefeller, y otros revelaron que muchas de las proteínas implicadas en las comunicaciones internas constaban de hileras de módulos, algunos de los cuales desempeñaban la función primaria de conectar proteínas entre sí. A veces, proteínas enteras de las vías de señalización sólo contenían módulos de conexión.

Pero, ¿de qué forma participaban tales módulos no enzimáticos en la comunicación celular, tan rápida y certera? Puede responderse: ayudan a los dominios enzimáticos en la transmisión eficiente de la información. Cuando una proteína dotada de una unidad de conexión porta, además, un módulo enzimático, el engarce de esa región conectora en otra proteína se aprovecha para alojar el módulo enzimático allí donde más se necesita. En el proceso de enlace de una enzima, se acerca una región de ésta a los factores que la tornan activa y en contacto inmediato con la diana buscada por dicha enzima. En el caso de ciertas proteínas portadoras de SH2, el módulo de conexión podría hallarse, en un principio, plegado alrededor del dominio enzimático hasta el punto de sofocar la función enzimática. En cuanto el dominio SH2 se suelta para trabar un receptor activado, la enzima queda liberada, presta para actuar sobre su objetivo.

Aun cuando una proteína esté formada exclusivamente por módulos de conexión con proteínas puede funcionar como un adaptador indispensable. Para representarlo nos sirve la imagen del cajetín-alargo con varios enchufes, unido por un macho a un solo enchufe. En el adaptador se conecta un módulo con un complejo ca-

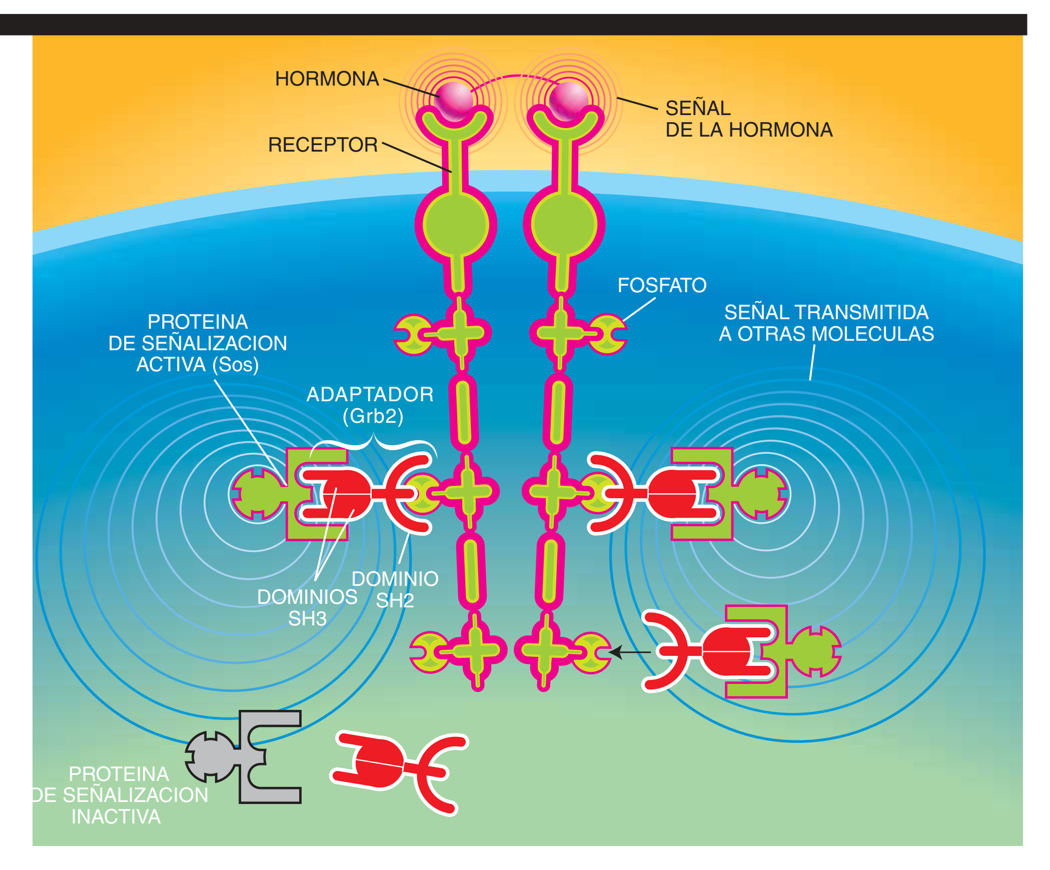


2. DOMINIO SH2 (*estructura globular*) de una molécula de señalización. Se halla unido a un segmento de un receptor (*modelo de varillas*). Los dos encajan; ello se debe, en parte, a la presencia de un bolsillo dotado de carga positiva en SH2 que se atrae al fosfato, cargado negativamente y que se ha añadido al aminoácido tirosina en el receptor. También los aminoácidos del receptor cercanos encajan en un surco hidrofóbico con SH2. Todos los dominios SH2 pueden unirse a tirosinas fosforiladas, pero difieren en el socio al que se enlazan, porque varían en su capacidad para acoplarse a los aminoácidos situados junto a la tirosina en la cadena polipeptídica.



Ventajas de los adaptadores

Las moléculas adaptadoras, constituidas en su integridad por módulos de conexión (SH2 y SH3), intervienen de una forma destacada en numerosas vías de señalización. Gracias a ellas, las células pueden servirse de proteínas que, por sí mismas, serían incapaces de participar en un circuito de comunicación. Ilustramos, por mor de ejemplo, la proteína adaptadora Grb2 (*roja*); ésta arrastra la proteína enzimática —Sos— hacia una vía encabezada por un receptor que, por sí solo, carece de la posibilidad de acoplarse a Sos.



paz de inducir señales; en tanto que los otros módulos permiten que se unan a la red más proteínas. Tales adaptadores moleculares logran que las células echen mano de enzimas que quedarían al margen de determinado circuito de señalización; lo que no es pequeña ventaja.

Tampoco se agota ahí el papel de los módulos no enzimáticos en su labor de apoyo a la comunicación. Ciertas moléculas de una vía de señalización presentan un módulo de unión a proteínas y un módulo de unión a ADN, que reconoce un segmento específico de la secuencia de nucleótidos del ADN de un gen. (Los nucleótidos son los componentes de los genes, que determinan la secuencia de aminoácidos de las proteínas.) James E. Darnell, Jr., de la Universidad Rockefeller, demostró que, cuando una de estas proteínas se une, por medio de su módulo de conexión, a una quinasa receptora activada, la interacción provoca el desprendimiento de la proteína, su tránsito al núcleo y su asociación con un gen determinado, con la inducción consiguiente de la síntesis de una proteína. En este ejemplo, la enzima, única, de la cadena de señalización es el propio receptor. Cuanto sucede después de la activación del receptor corre a cargo del reconocimiento de otras proteínas o del ADN.

Conforme se iba desgranando este rosario de descubrimientos, la investigación celular demostraba que el citoplasma distaba de ser una entidad amorfa. Se hallaba repleto de orgánulos y proteínas, en apretado empaquetamiento. Quedaba, por todo ello, manifiesto que la señalización precisa y fiel del interior celular dependía estrictamente de este tipo de broches a través de los cuales se acoplan ciertas proteínas. Los complejos formados aseguran que las enzimas o los módulos que se unen al ADN y sus objetivos se presenten juntos y en la secuencia correcta, a partir de la activación del receptor instalado en la superficie de la célula.

Seguridad y especificidad

Los estudios sobre las tirosinaquinasas receptoras y los dominios SH2 han contribuido también a esclarecer por qué las células garantizan que sólo se combinen las proteínas correctas cuando de establecer una vía de señalización se trata. Poco después de que se identificaran los dominios SH2, se observó que tales módulos aparecían en un centenar largo de proteínas. ¿Qué era lo que evitaba que diferentes receptores activados atrajeran las mismas proteínas portadoras de grupos SH2 y produjeran, por tanto, efectos idénticos en las células? (Para el buen funcionamiento del organismo importa que receptores y hormonas diferentes ejerzan efectos distintos en las células. Semejante especificidad exige que los receptores se hallen vinculados con vías de comunicación algo diferentes.)

La respuesta es bastante sencilla. Cada dominio SH2 incluye una región que encaja suavemente sobre una tirosina portadora de un fosfato, lo que se llama una fosfotirosina. Pero cada dominio abarca también una segunda región, que difiere de un SH2 a otro. Esa segunda región, como Lewis C. Cantley de la Universidad de Harvard ha demostrado, reconoce una particular secuencia de unos tres aminoácidos próximos a la fosfotirosina. Por tanto, todos los dominios SH2 pueden unirse a la tirosina fosforilada, pero estos módulos varían en su preferencia por los aminoácidos adyacentes en un receptor. Los aminoácidos alrededor de la tirosina sirven, pues, de clave para especificar qué versión del dominio SH2 puede unirse a un determinado receptor que porte una fosfotirosina. Puesto que cada dominio SH2

se une a un dominio enzimático diferente o módulo de conexión, esta clave dicta también qué vías se activarán con ese receptor. Otros tipos de módulos de conexión operan de manera similar.

Para ilustrar los principios descritos, vengamos a la vía que se activa por el factor de crecimiento derivado de las plaquetas. Trátase de una proteína que se libera cuando se daña un vaso sanguíneo. Su unión a una tirosinaquinasa receptora, en una célula del músculo liso de las paredes de los vasos, hace que esos receptores se asocien y se fosforilen en presencia de tirosina. Este cambio atrae al receptor la proteína Grb2, constituida por un dominio SH2 específico y flanqueado en ambos lados por otro dominio de conexión, SH3. Un adaptador clásico, Grb2 carece de poder enzimático; pero sus dominios SH3 (que se unen al aminoácido prolina) enlazan al receptor una proteína Sos dotada de actividad enzimática. A su vez, Sos activa a la proteína Ras, asociada a la membrana. Ras pone en marcha una serie de procesos enzimáticos que terminan por estimular proteínas del núcleo que activan genes promotores de la división celular, lo que redunda en la cicatrización de la herida.

Según parece, las redes de señalización dirigidas por tirosinaquinasas receptoras fían en proteínas adaptadoras de escasa magnitud. De los análisis de circuitos de comunicación de neuronas cerebrales se desprende que ciertas proteínas de las vías nerviosas poseen un número ingente de dominios de conexión. Tales proteínas, denominadas a menudo moléculas de andamiaje, mantienen en su sitio y de forma permanente grupos de proteínas de señalización. La propia existencia de dichos andamios significa que hay redes de señalización tendidas en el interior celular; semejante cableado re-

Líneas de comunicación y patologías

Son múltiples las enfermedades humanas que tienen que ver con una señalización celular aberrante. El cáncer, caracterizado por una proliferación celular descontrolada y una migración sin freno, constituye un ejemplo paradigmático. En su raíz el cáncer es el resultado de mutaciones genéticas. Algunas ejercen su efecto perverso convirtiendo en hiperactivas las proteínas de las vías de transmisión de señales, en particular de aquellas vías que, en condiciones normales, inducen la división celular en respuesta a órdenes externas. Las proteínas afectadas provocan que las células se comporten como si recibieran permanentemente la orden de dividirse, aun cuando tal imperio no exista.

En el tratamiento del cáncer de mama se emplean ya agentes de bloqueo de señales. Y se investiga en otros tumores más. A este respecto, determinadas pruebas clínicas recientes sugieren que un fármaco capaz de detener el "habla" exaltada de tirosinaquinasa de Abelson, una enzima, podría coadyuvar en el tratamiento de ciertas formas de leucemia.

No menos nefasto es ese exceso de celo señalizador en la enfermedad linfoproliferativa ligada al cromosoma X (XLP), un síndrome hereditario. En los pacientes de XLP, el virus de Epstein-Barr, habitualmente benigno, insta una respuesta letal de las células T asesinas, que pertenecen al sistema inmunitario.

La razón de esa reacción mortal se descubrió hace un par de años. Los enfermos de XLP carecen de la proteína SAP, constituida por un dominio SH2 (emparentado con el dominio SH2 mencionado en el artículo). Cuando las células T asesinas detectan que hay otras células infectadas por el virus de Epstein-Barr, desencadenan una cascada señalizadora que les capacita para atacar a las infectadas. La SAP suele mantener bajo control el ataque, ocupando los sitios interactivos de algunos componentes de señalización y cortando así la cadena de señales. Pero sin la SAP, los pacientes de XLP carecen de un inhibidor importante de la hiperactividad celular.

Los procesos patológicos pueden producirse también en condiciones opuestas; es decir, cuando los sistemas de señalización intracelular que deberían estar activos caen en una quietud indolente. Sucede en los trastornos provocados por falta de respuesta contundente del sistema inmunitario. Se da, asimismo, una señalización insuficiente en la diabetes de tipo 2, que se presenta en la madurez. Los miocitos y los adipocitos del organismo captan azúcar de la sangre tras recibir la orden de la insulina, segregada por el páncreas. Si los receptores de insulina de esas células dejan de enviar el mensaje de la insulina a las moléculas intermedias del interior, puede producirse la diabetes (desmesurado nivel de azúcar en la sangre). La medicación oral indicada para aumentar la actividad de los receptores de insulina o de los agentes posteriores en la cadena de señalización podría reemplazar las inyecciones de insulina en algunos diabéticos. Uno de esos compuestos, que estimula el receptor de insulina, se ha probado con éxito en el ratón.



LA PESTE NEGRA, epidemia que causó una gran mortandad en el siglo XIV, fue provocada por *Yersinia pestis*. Esta bacteria se aprovecha de las vías de señalización de las células del huésped para promover su propia difusión.

Las bacterias y los virus son expertos en aprovechar los sistemas de señalización de las células humanas para su multiplicación y propagación. Esta capacidad se revela con toda claridad en *Yersinia pestis*, la bacteria responsable de la epidemia de peste en el siglo XIV, y en algunas cepas patógenas de *Escherichia coli*. Los microorganismos inyectan sus propias proteínas en las células humanas. Algunas de estas proteínas alteran las vías de señalización en el sentido de promover la asociación de las bacterias con las células del huésped y desarmar las defensas antibacterianas de las células.

Los virus, por su parte, penetran en las células humanas engarzados en los receptores que dirigen circuitos de señalización. Allí instalados, pueden luego modificar las redes de comunicación interna de una célula para potenciar su propia replicación y difusión. El virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), causante del sida, es uno de los múltiples que hacen uso de estas vías nefastas.

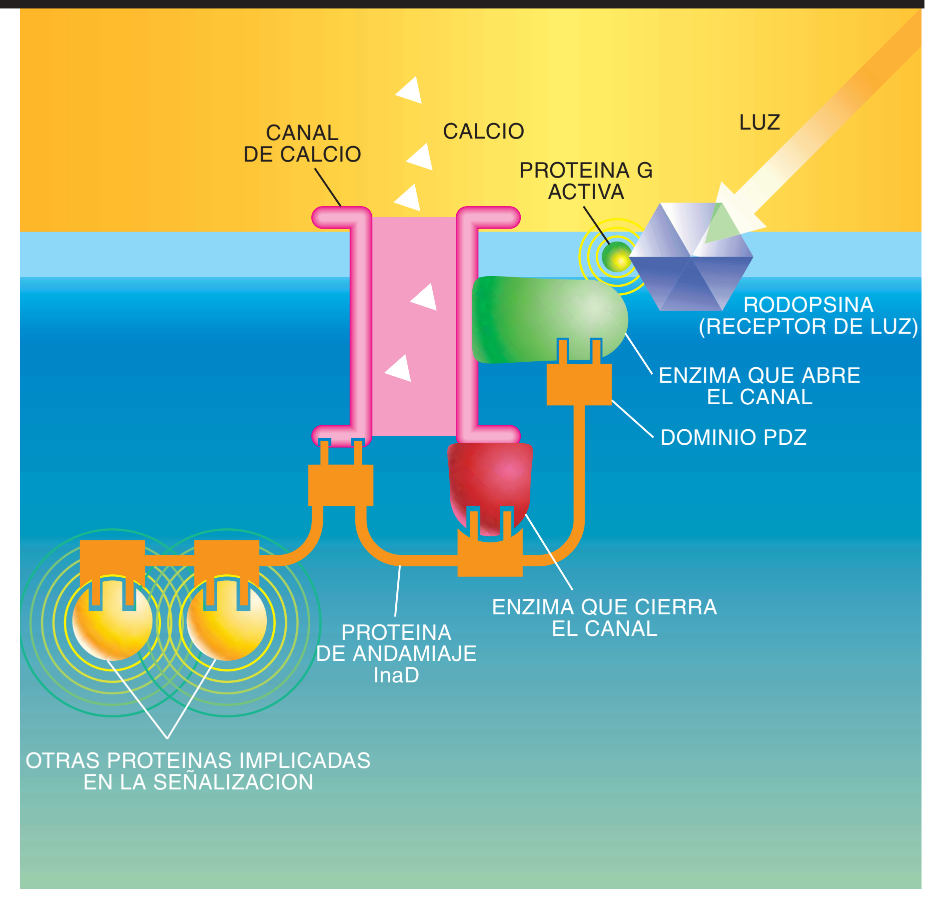
A medida que se vayan descifrando los nexos entre fallos en la señalización y enfermedad, aparecerán terapias que compensen o reparen tales disfunciones.

—T.P y J.D.S.

Los andamios aceleran la transmisión de señales

Las proteínas de andamiaje, que descansan sobre otras proteínas, aseguran la operación conjunta de múltiples moléculas de señalización. La InaD (*diagrama*), una de ellas, actúa en las células del ojo de la mosca del vinagre —estructura compuesta de muchos ocelos (*fotografía*)— y participa en el envío de mensajes visuales al cerebro. Tres de los cinco dominios de conexión "PDZ" del andamiaje atrapan, por separado, un canal de iones, una enzima que abre el canal cuando la luz incide sobre un receptor luminoso cercano (rodopsina) y una enzima que cierra el canal inmediatamente después. Los dos dominios PDZ restantes contribuyen a la transmisión de la información reteniendo en su sitio otras moléculas de señalización.





fuerza la velocidad y exactitud de la transferencia de información.

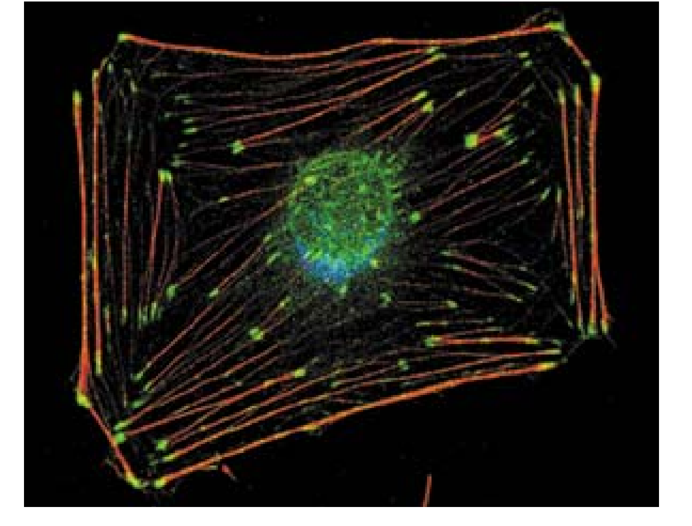
Redes y andamios

La proteína que responde al nombre de PSD-95, bien estudiada, opera fundamentalmente en las neuronas implicadas en el aprendizaje. En el tejido nervioso las señales pasan de una neurona a otra en las sinapsis o puntos de contacto. La primera neurona libera un neurotransmisor químico en la hendidura que media entre las células. Los receptores que hay en la segunda célula atrapan el neurotransmisor e instan la apertura de los canales de iones de la membrana. La entrada de iones activa las enzimas necesarias para la propagación del impulso eléctrico. Una vez generado, el impulso viaja por el axón hasta las múltiples ramitas; les induce a liberar más neurotransmisor. Para que el impulso en cuestión se produzca, deben entrar en acción, casi simultáneamente, muchos componentes del sistema de señalización.

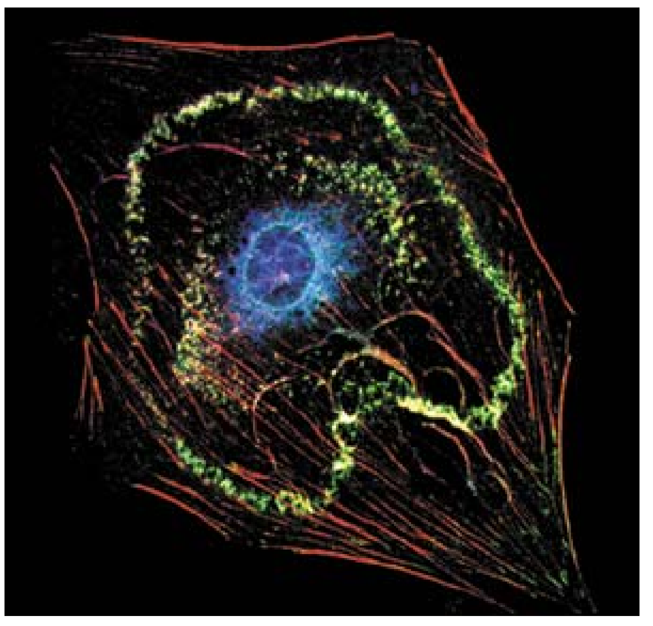
Entre los múltiples módulos de conexión de PSD-95, nos interesan tres, los PDZ. Uno de estos dominios se enlaza a la cola citoplásmica del receptor del neurotransmisor glutamato; otro se une a un canal de iones que atraviesa la membrana (controla la entrada de potasio), y el tercer dominio se prende de proteínas del citoplasma (como si se agregara un módulo adicional al andamio). Así, el PSD-95 ayunta a varios componentes de señalización a la vez, posibilitándoles coordinar sus actividades. El ojo de la mosca del vinagre se apoya también en una proteína de andamiaje que contiene PDZ —la InaD— para la transmisión eficiente de información del ojo al cerebro (*véase la figura 3*).

Se acaba de descubrir otro complejo preformado en las neuronas de mamíferos. El elemento central es yotiao, una proteína de andamiaje. Según demostrara el grupo de Scott, coautor del artículo, esta molécula cumple una doble función: en cuanto proteína que abarca todo el espesor de la membrana, es receptor del glutamato y canal de iones. Se une a una quinasa que añade

3. DOS PROTEINAS DE ANDAMIAJE resaltan en la neurona mayor de esta micrografía. Una, yotiao (*verde*), lleva enzimas transmisoras de mensajes junto a un canal de iones implicado en la transmisión de señales. La otra, PSD-95 (*rojo*), congrega a un receptor y diferentes canales de iones en sinapsis elegidas, los puntos de contacto entre las neuronas. El azul de ambas neuronas define la ubicación de una enzima señalizadora específica.



4. FLUJO DE UN MENSAJE en una célula de la piel. Para evidenciarlo se han coloreado dos componentes de una vía de señalización: una proteína de andamiaje (*verde*) y una de las dos enzimas columpiadas en el andamio (*azul*). La actina, un elemento estructurado de las células, aparece en rojo. La célula superior se halla en reposo. Poco después de que un mensajero externo activara una vía de señalización en la célula inferior, la proteína de andamiaje movió sus enzimas ancladas hacia objetivos adentrados en la célula. Ese movimiento se manifiesta en el tinte amarillo, que se produce por la superposición de componentes señalizadores coloreados y actina. (A la actina están unidos los objetivos de la enzima.) La masa azul del centro refleja la existencia de copias adicionales de la enzima coloreada.



fosfato al canal de iones y, por tanto, lo abre cuando el glutamato activa al receptor. Y se ancla, por fin, en una fosfatasa, una enzima que elimina de las proteínas el fosfato. Esta fosfatasa engarzada cierra el canal de iones siempre que el glutamato falte del receptor. Con semejante disposición, tan elegante, se asegura que los iones fluyan sólo por el canal cuando el glutamato está presente en el receptor.

Quinasas y fosfatasas controlan buena parte de la actividad celular. Si una quinasa estimula una proteína, una fosfatasa se encargará de inactivarla, o viceversa; las células humanas fabrican centenares de quinasas y fosfatasas diferentes. Así las cosas, las proteínas de andamiaje constituyen una solución para evitar que una fosfatasa o una quinasa inadecuada opere sobre un objetivo impropio; facilitan las reacciones indicadas manteniendo las quinasas y fosfatasas seleccionadas en la proximidad de las proteínas pertinentes; es decir, junto a las que se supone que han de regular.

Múltiples compromisos

Desde la perspectiva de la evolución celular, la adquisición de un sistema modular de señalización resultaría de innegable interés. Con la combinación y acoplamiento de los módulos existentes, la célula genera muchas moléculas y agregados de moléculas, para así construir redes de vías interconectadas; no necesita, pues, inventar un gigantesco repertorio de bloques de construcción. Y lo que reviste mayor interés: cuando surge un nuevo módulo, su combinación con los disponibles multiplica la versatilidad, a la manera en que la ampliación del código de una ciudad incrementa las posibilidades de números de teléfono para nuevos abonados.

El biólogo se siente recompensado si logra abrir pequeños resquicios del misterio encerrado en la función celular, múltiple y variopinta. Pero el significado de los nuevos hallazgos trasciende el puro afán intelectual.

El Proyecto Genoma Humano nos ha revelado la secuencia de nucleótidos. Antes de traducir esa información en algo útil para el tratamiento de las enfermedades, habrá que acotar la función biológica de los genes que se vayan identificando. Dicho de otro modo, deberá averiguarse qué misión desempeñan las proteínas correspondientes y qué sucede cuando se producen en número desproporcionado, por exceso o por defecto, o se sintetizan de manera incorrecta.

Conocemos ya las secuencias aminoacídicas y las funciones de muchos módulos de proteínas de señalización. Disponemos, pues, de una suerte de clave para determinar si la secuencia nucleotídica de un nuevo gen descubierto cifra una proteína de señalización y, si es así, con qué moléculas se relacionará ésta. Cuando alcancemos a desentrañar un número suficiente de tales interacciones, tendremos en nuestras manos el mapa de redes, el "diagrama de cables" de cada tipo celular del organismo. Bastará incluso un diagrama parcial, quizá, para que podamos reparar disfunciones en la red: cortar señales aberrantes o encaminarlas hacia objetivos de nuestra elección; por ejemplo, trocar las órdenes de proliferación de las células cancerosas en instrucciones de autodestrucción. Si desciframos el lenguaje que las células usan para comunicarse entre sí, podremos entender sus conversaciones y hallar vías para intervenir cuando las comunicaciones salgan de su cauce.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR BIOLOGY OF THE CELL. Bruce Alberts y cols. Garland Books, 1994.

PROTEIN MODULES AND SIGNALLING NETWORKS. Tony Pawson en *Nature*, vol. 373, págs. 573-580; 16 de febrero de 1995.

SIGNALING THROUGH SCAFFOLD, ANCHORING AND ADAPTOR PROTEINS. Tony Pawson y John D. Scott en *Science*, vol. 278, págs. 2075-2080; 19 de diciembre de 1997.

SIGNALING: 2000 AND BEYOND. Tony Hunter en *Cell*, vol. 100, n.º 1, págs. 113-127; 7 de enero de 2000.

Los tejidos de los príncipes celtas

Los tejidos descubiertos en las sepulturas aristocráticas de Europa central revelan la pericia técnica alcanzada por los celtas en el transcurso de la primera Edad del Hierro

Christophe Moulherat

El comienzo del primer milenio antes de la Era Cristiana, entre el siglo VIII y el V, constituye un período clave de la historia de los tejidos, por ser entonces, durante la primera Edad del Hierro —todavía llamada período de Hallstatt, en homenaje a la gran necrópolis austríaca—, cuando se produce la sustitución del tradicional telar vertical de dos barras, herencia del Neolítico y de la Edad del Bronce, por el de cuatro y cuando aparece, asimismo, el telar de tablillas (*véase la figura 3*). Con estos nuevos ingenios, los tejedores fabrican paños de cierta complejidad en los que, gracias a la mezcla de colores, a la combinación de técnicas y al empleo de fibras diversas, se consiguen motivos armoniosos, sin parangón hasta el Imperio Romano.

Esta revolución en el ámbito de los tejidos encuentra cierta correspondencia con los cambios sociales, políticos y culturales que sufren paralelamente las comunidades de la primera Edad del Hierro de la Europa templada (*véase la figura 2*), esto, es los celtas, que se extienden del norte de Alemania al norte de Suiza y del Macizo Central francés a Bohemia. La aristocracia allí surgida alcanzó una indudable prosperidad gracias al control de las vías de comunicación, lo que explica la reiterada ocupación de poblados en altura y fortificados, a lo largo de los entonces principales ejes de comercio: los valles del Danubio, del Rin y del Ródano. Además, se hizo inhumar en tumbas fastuosas, con ricas ofrendas de bronce, joyas de oro, los primeros objetos de hierro y numerosas manufacturas textiles.

Entre el ocaso de la Edad del Bronce y el fin de la Edad del Hierro (del siglo IX al V a.C.), las prácticas funerarias aristocráticas experimentan modificaciones: del siglo IX al VII, los difuntos son enterrados con una espada de bronce o de hierro; en el siglo VI, las tumbas contienen vasos metálicos, adornos de oro y un carro de cuatro ruedas, y en el V las tumbas de inhumación ceden paso a sepulturas de incineración en urna de bronce, todo ello sin mayores obstáculos para que, en períodos de transición, puedan coexistir varias de tales prácticas. En todo caso, los cambios son representativos de formas diferentes de poder, simbolizadas en la tumba por una combinación de objetos distintos.

Normalmente, a causa de su naturaleza orgánica, los tejidos de estas tumbas sufren descomposición y sólo sobrevive alguna huella de ellos en condiciones muy particulares: mineralizados, por recubrimiento de sales o por impregnación, debido al contacto con un objeto metálico en proceso de corrosión. Por tanto, sin esta providencial circunstancia, no habría resultado posible el acceso a unos documentos tan vulnerables y, al tiempo, tan interesantes de cara a la investigación de la técnica, el entorno y los animales de la Edad del Hierro.

Los tejidos mineralizados han merecido multitud de estudios, pero hasta hace pocos años no se sabía cómo identificar sus fibras. Un nuevo método de análisis puesto a punto en el Centro de Investigación y Restauración de los Museos de Francia, en París (*véase el recuadro*) permite hoy en día precisar su naturaleza vegetal o animal, cualquiera que sea la conservación. Se determinan asimismo las condiciones en que se han obtenido las fibras y las propiedades que han dado lugar a su elección: calidades técnicas (facilidad de hilado, capacidad hidrófoba), económicas (viabilidad del aprovisionamiento, productos de lujo orientados al intercambio) y culturales (preferencia por ciertos materiales y desdén por otros).

El análisis de un conjunto de telas y estofas de tumbas aristocráticas del centro y del este de la Galia, enriquecido con otros ejemplares de regiones limítrofes, revela las características y la evolución de los tejidos en la Europa céltica durante cerca de cinco siglos. Estos vestigios de textiles recubren los ajuares de las sepulturas de los príncipes celtas —al principio las espadas, después los carros y, por último, las urnas— y nos ilustran sobre las prácticas funerarias, sobre las técnicas del tejido y sobre la naturaleza de las fibras entonces utilizadas.

CHRISTOPHE MOULHERAT, arqueólogo y especialista en textiles antiguos, se halla adscrito al Centro de Investigación y Restauración de los Museos de Francia.

Espadas envueltas en tejidos

A partir del siglo IX antes de la Era Cristiana, entre Bohemia y el centro del actual territorio de Francia, se construyeron numerosos túmulos que no llegan a 1,5 m de altura y casi 20 de diámetro, cuyo ajuar funerario, esto es, el conjunto de ofrendas que contiene cada uno, está fundamentalmente constituido por una

1. TEJIDOS CELTAS ANTIGUOS reconstruidos, de la primera Edad del Hierro, cuyos vestigios aparecieron en la tumba de un príncipe, en Hochdorf (Alemania). Estos tejidos decoraban la cámara funeraria y embalaban los objetos preciosos con los cuales era enterrado el difunto. El tejido de la izquierda se realizó en telar de tablillas (una técnica que aparece en la primera Edad del Hierro y permite la producción de tejidos elaborados), mientras que el motivo de esvásticas (cruz de ramas acodadas), sobre el tejido de arriba a la derecha, está tramado con la técnica de la lanzadera volante (igualmente una novedad técnica de la Edad del Hierro); a la derecha, abajo, el losange es uno de los motivos geométricos decorativos que los celtas utilizaban de preferencia en esa época.



2. LA EUROPA CELTICA. En verde oscuro se ilustra el territorio original de los celtas en la primera Edad del Hierro; en verde claro, la principal zona de expansión de los celtas en la segunda Edad del Hierro.

espada —al principio de bronce, después de hierro—, símbolo del estatuto excepcional del difunto. Las espadas, por otra parte, han sido objeto de un tratamiento particular en el que los textiles desempeñan una importante función, como se desprende de que, en la mayoría de los casos, conserven sobre la hoja restos de uno o de varios tejidos mineralizados, sistemáticamente ausentes en otro tipo de objetos de metal, ya se trate de navajas de afeitar o de piezas de arnés.

¿Pudo formar parte de primitivas vainas este tejido? Varias espadas del fin de la Edad del Bronce (en Saint-Romain-de-Jalionas, en Isère, o en Chavéria, en el Jura) y del comienzo de la Primera Edad del Hierro (en Soucia, en el Jura, y en la bávara Bastheim) han sido halladas entre dos tablitas de madera unidas por un paño impregnado de un residuo negro. En otros casos, como el de Hossingen (Baden-Wurtemberg), se sustituyó el tejido por cuero. ¿Se trata de una vaina o simplemente de un simbólico velo protector? Desde el siglo VII, se recurre a una banda de tejido de 5 a 10 cm de ancho para envolver las hojas, e incluso a varias superpuestas, como en Appenwihr (Alto Rin); resulta bien evidente que se trata de protecciones, pues las vainas propiamente dichas yacen vacías en las proximidades de las armas (yacimientos de Clayeures y de Haroué, en Lorena). En conclusión, hoy se da por hecho que el uso de aquellas tablitas sujetas con tejido fue sustituido más tarde por su envolvimiento en una tira de paño.

El análisis de los tejidos conservados sobre estas espadas revela la aplicación de esquemas innovadores en el entrelazado de los hilos. Tales esquemas o armaduras de tejido sólo pueden salir de telares dotados de cuatro barras horizontales (*véase la figura 3*). A partir del siglo IX, gracias a esta evolución del telar, las armaduras se diversifican, siendo la principal el asargado, que consiste en producir esquemas oblicuos o diagonales alterando el ritmo normal de entrecruzado, hilo a hilo, de urdimbre y trama (*véase la figura 6*). Sus tipos, en efecto, serán distintos en función de esta cadencia. Por ejemplo, para un asargado de la variedad 2/2, la trama habrá de discurrir por encima de dos hilos verticales (estambres) consecutivos y después por debajo de los dos siguientes, con el resultado del salto de un estambre o pie a cada paso de la misma. El asargado es básico para la confección de motivos como los dientes de lobo (*chevrons*) y losanges, muy propios también de este momento. La calidad y la variedad de las que dan muestra estas sargas obligan a pensar en un trabajo maduro, con dilatados ensayos previos de los que sólo han llegado hasta nosotros unos pocos testimonios. Entre éstos, un paño con motivos de losanges, del fin del segundo milenio o del comienzo del primero antes de nuestra Era, descubierto en Gerumsberg, en el sur de Suecia, o la huella de una sarga de parecida antigüedad detectada en la Grotte des Fraux, en la Dordoña.

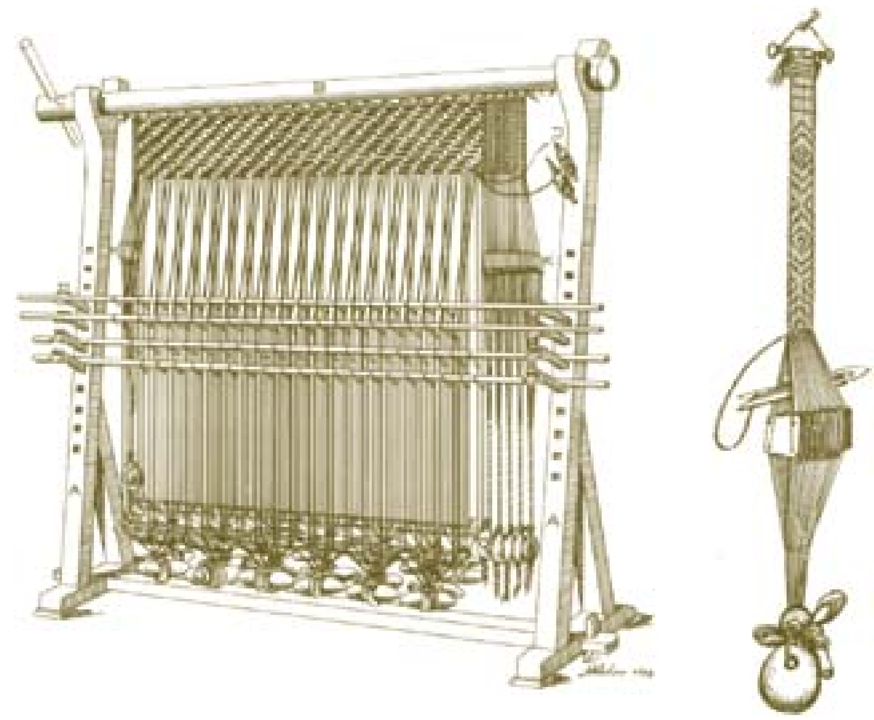
A pesar de la aparición de algunas de estas nuevas armaduras, la mayoría de los textiles conservados sobre las espadas son telas, es decir, los tejidos más simples, en los que los hilos de la urdimbre se entrecruzan de uno en uno y sin saltos con los de la trama (*véase la figura 6*). Se habla entonces de armaduras regulares o de trama dominante, por cuanto los hilos de esta última, apretados, recubren prácticamente los verticales. En toda la Europa céltica, estas telas son de una finura sorprendente y de una gran solidez.

Gracias a la identificación de fibras, se sabe hoy cuándo los tejedores comenzaron a utilizar la lana en la Galia o cómo, en la primera Edad del Hierro, los celtas seleccionaban ya las ovejas por su tipo de vellón, siendo preferidos los medianamente crinosos y aquellos otros de finura media que se habían empezado a aprovechar desde el fin de la Edad del Bronce en Dinamarca y en el norte de Alemania. Los primeros se caracterizan por ofrecer unos pelos que han perdido su rudeza y se transforman en lana, así como por una subcapa lanosa más espesa; una reducción suplementaria del grosor de las cerdas, acompañado de un aumento del diámetro de las fibras de la subcapa lanosa, marca la evolución hacia el segundo tipo de vellón.

También fueron utilizadas numerosas fibras de origen vegetal como el lino, el cáñamo y la ortiga. El lino, en concreto, es la materia prima más corriente y su explotación se remonta al Neolítico. Las fibras de ortiga son más raras y los ejemplos más antiguos conocidos, del siglo VIII antes de nuestra Era, han sido descubiertos en las sepulturas danesas de Bohøj y de Pierrefitte-sur-Sauldre, en Loir-et-Cher. En fin, varios tejidos mezclan materiales diferentes, como los documentados sobre esta misma espada de Pierrefitte-sur-Sauldre, en los que se combinan hebras de lino y de ortiga.

El uso de tejidos asociados a armas y sobre todo a espadas, del que existen pruebas desde comienzos del siglo IX antes de nuestra Era, se perpetúa a lo largo de toda la primera Edad del Hierro. Resultan reveladores en este sentido, a partir del siglo VI, algunos puñales aislados como el de Larçon, en Côte d'Or, y, en el inicio de la segunda Edad del Hierro, la espada de Rascheid (Alemania del Sur), aunque aquí podría hablarse ya, más bien, de sólo un recuerdo de aquella vieja costumbre.

El embalaje de las espadas con tejido fue, por tanto, un hecho con-



sustancial con las prácticas funerarias aristocráticas del primer Hierro y se manifestó en todas las variedades de enterramiento de los príncipes de la Europa céltica.

Los tejidos de las sepulturas de carro

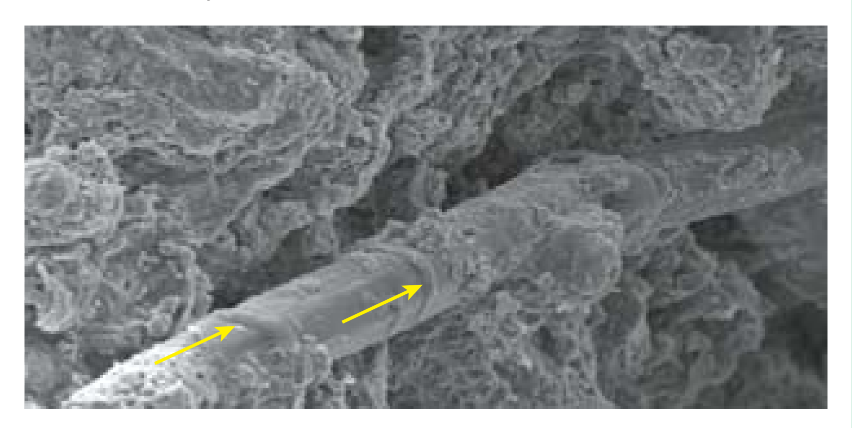
Hacia el final del siglo VIII, las tumbas de carro suceden a las tumbas con espada, aunque persista su emplazamiento en las inmediaciones de los lugares de habitación y cerca de los principales ejes de intercambio. Se distinguen, sin embargo, por un túmulo de mayor superficie y más alto, en el interior del cual se encuentra una cámara mortuoria revestida de tablas y troncos de madera. Un carro de cuatro ruedas, una vajilla de chapa de bronce —importada de Italia— y adornos anulares de oro (barras, pendientes, torques) constituyen la esencia del

3. TELARES DE DOS BARRAS o enjulios (*abajo*), de cuatro barras (*arriba a la izquierda*) y de tablillas (*arriba a la derecha*), aparecidos en la primera Edad del Hierro. Permiten obtener tejidos complejos. El principio del telar de cuatro barras es el mismo que el del telar de dos barras, heredado del período precedente: cada estambre o hilo de urdimbre está anclado en una de las barras; la que tira hacia delante, desplaza los hilos para crear una abertura por la que pase la trama (no representada). Con el telar de cuatro barras, se pueden desplazar cuatro grupos de hilos diferentes, y así producir tejidos más complicados. El telar de tablillas se utiliza haciendo girar las placas en su plano, para crear una abertura diferente entre los hilos cada vez que cruza la trama.

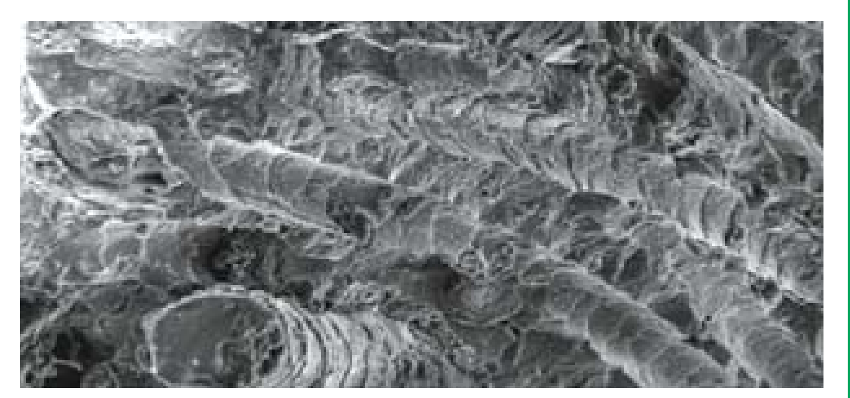
La identificación de las fibras mineralizadas

Los métodos clásicos de identificación, así la microscopía óptica de transmisión, no resultan eficaces para el análisis de las fibras mineralizadas. En el Centro de Investigación y Restauración de los Museos de Francia, hemos puesto a punto un nuevo método basado en el reconocimiento de la morfología específica de cada una de las fibras. Se trata de una combinación de la microscopía electrónica de barrido y de la microscopía óptica de reflexión, que exige una preparación de la muestra: se la recubre de una delgada chapa de oro que hace su superficie conductora, para después observarla al microscopio. Los principales elementos de referencia para distinguir las fibras textiles se resumen de la siguiente manera: presencia o no de escamas (*véase la fotografía inferior*) o agrupamiento de las fibras formando un haz. La muestra se incluye, a continuación, en un bloque de resina translúcida. Después de una polimerización que dura un máximo de 24 horas, se pule al diamante y el corte obtenido se observa al microscopio óptico de reflexión. El examen de los cortes longitudinales y transversales es indispensable para la determinación de la naturaleza de las fibras, pues cada una de ellas posee sus propias características. Se mide el diámetro de las fibras para determinar la calidad del vellón y el animal que lo ha proporcionado o para conocer su grado de madurez en el caso de las fibras vegetales.

Se consigue así, acceder a una dimensión de la cultura material antes desconocida, a la par que se abren grandes perspectivas de estudio sobre la gestión de los recursos naturales y sobre sus estrategias de explotación, ya sea en el propio terreno o como productos de intercambio.



Fibras de lino vistas al microscopio electrónico de barrido. La sección poligonal y las "rótulas" de flexión (especie de abultamiento anular —*flechas amarillas*—, a lo largo de la fibra, análoga a la separación de los tramos de una caña de bambú) son característicos de las fibras leñosas. Esta, en concreto, procede del yacimiento de Lazenay (Cher), del siglo V antes de nuestra Era.



Fibras de lana de oveja observadas al microscopio electrónico de barrido. La presencia de escamas es el mejor indicador para distinguir las fibras animales de las vegetales. Sessenheim (Alto Rin), siglo V antes de la Era Cristiana.

mobiliario fúnebre, al que se añaden numerosas piezas de tejido.

En 1978, el descubrimiento de la sepultura de Hochdorf, en Baden-Wurtemberg (Alemania del Sur), en óptimo estado de conservación, dio pie a conocer un amplio muestrario de las manufacturas textiles del siglo VI a.C. La cámara mortuoria contenía, en efecto, un verdadero tesoro de tejidos que proporcionó información no sólo sobre su forma de utilización, sino también sobre su función en las prácticas funerarias. El muerto, que yacía sobre un colchón de hierbas encima de una cama, estaba recubierto de varias mortajas muy finas de las que una tiene un bordado rojo vivo. El asiento y el espaldar broncíneos de la mencionada *cliné* se hallaban también tapados por numerosos lienzos. Nuevos paños ricamente adornados con motivos tejidos y bordados recubrían un caldero y, según un reciente estudio de Johanna Banck-Burgess, del Instituto de Prehistoria y Protohistoria de Friburgo, no sólo el muerto y el conjunto de ofrendas, incluido el carro, estaban envueltos en paños finos, sino también las paredes de la cámara, en este caso solemnemente vestidas con cortinas ribeteadas.

Es posible que algunos de estos tejidos sean de origen mediterráneo, lo que justificaría su confección mediante técnicas diferentes de las que habitualmente se observan en las tumbas de carro. Pero otros son, sin discusión, productos locales a juzgar por el tipo de armadura: una sarga de 2/2 cuyos estambres reforzados, de dos hilos simultáneamente encarrujados, muestran torsión en S, mientras los filamentos de la trama son simples y de torsión en Z (*véase la figura 6*). El otro tipo de armadura utilizada es una tela simple de hilos encarrujados de torsión en S y Z. Tal uniformidad y repetición de las armaduras textiles indica la existencia de convenciones bien asentadas en los talleres de tejido. Se encuentran también estofas con temas de cuadrados y rayas obtenidos por alternancia de colores y, en algunos casos, se cuenta con el juego sutil de la luz sobre la torsión de los hilos para crear un nuevo dibujo o acentuar un motivo.

Este período se halla también marcado por la aparición del telar de tablillas. Las tablillas son placas comúnmente cuadradas, de cinco a diez centímetros de lado, con un agujero en cada esquina para enhebrar los

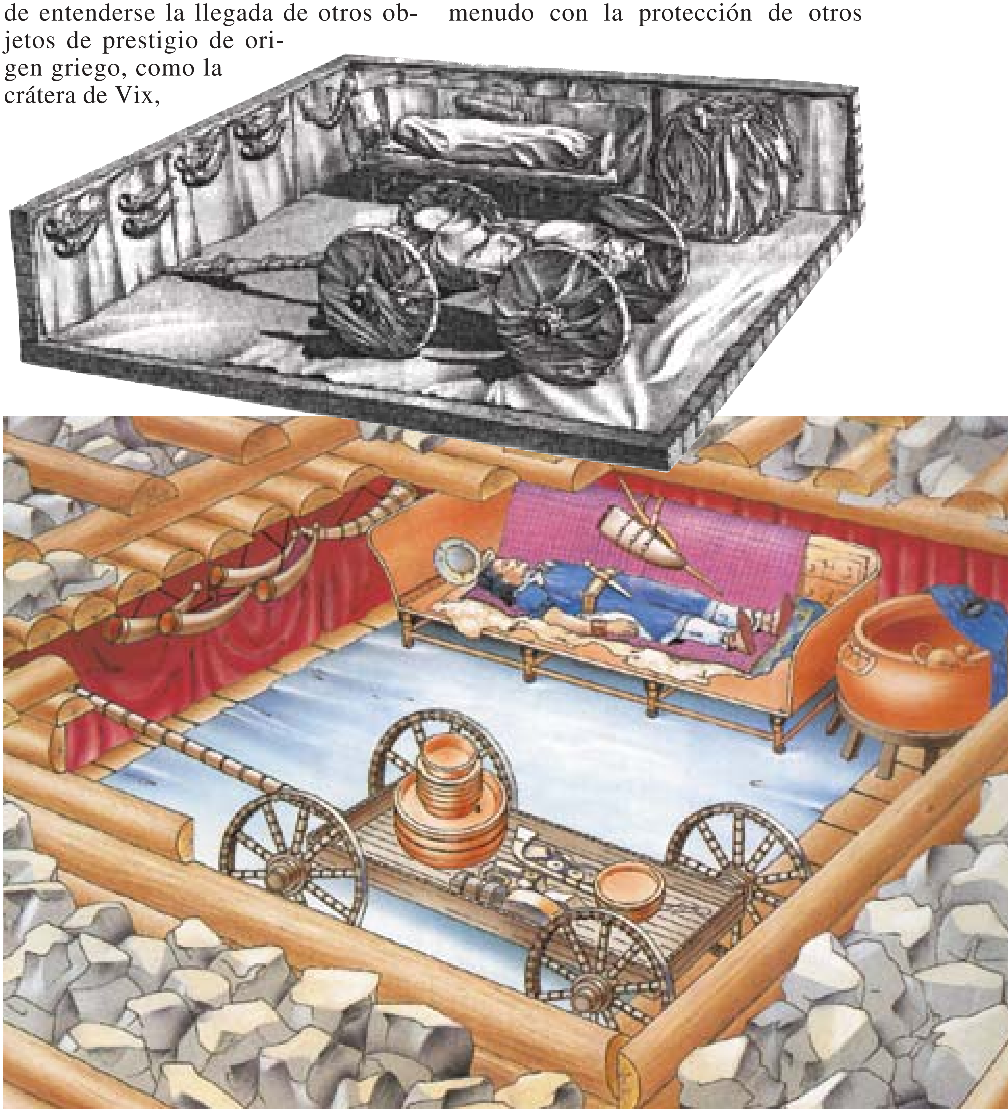
pies o hilos de urdimbre (*véase la figura 3*). Por rotación de las plaquitas, el tejedor habilita una nueva abertura entre los pies a cada cuarto de vuelta, por la que introducirá el cabo de la trama. Este tipo de telar sirve para la confección de artículos de escasa longitud, pero de una gran solidez, tales como cintas, correhuelas, cinchas, cinturones y ribetes. Estos últimos son muy numerosos y de una gran finura en la tumba de Hochdorf, donde, cubiertos de motivos de cierta complejidad y con una anchura de 2,5 a 4 centímetros, sirven de adorno tanto a la indumentaria personal, como a las cortinas y a las estofas que recubren los carros.

En el mismo Hochdorf no faltan otras técnicas nuevas, como la de la lanzadera volante, en la que se utilizan hilos de trama suplementaria para improvisar un motivo en el transcurso de la confección (*véase la figura 1*). Esta técnica, cuyos orígenes se remontan al comienzo de la Edad del Bronce en las regiones del entorno de los Alpes, según da cuenta el tapiz de Irgenhausen, en Suiza, desaparecerá en la segunda Edad del Hierro.

El estudio de los restos orgánicos revela la variedad de las materias primas utilizadas. El descubrimiento de tejidos de muy fina lana de oveja parece indicar que los tusones o vellocinos han evolucionado en relación a los de períodos precedentes y que determinadas materias primas brutas y productos acabados venían de las ciudades jonias de Asia Menor (Mileto), célebres en todo el Mediterráneo por producir lanas de calidad. En las tumbas célticas se han encontrado galones mezclados (con motivos en color) y prendas delicadas en lana fina de gamuza, cuerdecillas para la suspensión de útiles en seda de cerdo, en crines de caballo y en cáñamo, y hasta fundas de cojines tejidas con hierbas mezcladas, cuando no con pelo de tejón. La presencia de seda, que se creía identificada en varias sepulturas de carro, principalmente en aquellas de Hochmichele y Hochdorf, se halla hoy en cuestión; y sólo en la tumba de Vix (Côte-d'Or) podría haber unos pocos hilos, mineralizados, de ella.

Los celtas utilizaban paños coloreados con motivos geométricos de losanges y esvásticas (*véase la figura 1*), tanto en vestidos como en ropas decorativas. Tales manufacturas han llegado a descubrirse en muy pocas sepulturas principescas y no sin muchísima fortuna (en condiciones muy especiales de conservación) ya que los tintes sólo han conseguido sobrevivir en los tejidos que, milagrosamente, no están mineralizados. La mayor parte de ellas poseen huellas de coloración azul y roja. Los análisis de la capa del príncipe de Hochdorf han permitido comprobar que el rojo había sido obtenido a partir de un insecto de origen mediterráneo, el kermes (*Coccus illicis*), cuyo tinte desempeña una importante función en el culto a los muertos en dicho ámbito. Su presencia viene a ser, pues, un indicio más de la frecuencia de los contactos habidos entre las poblaciones del norte de los Alpes y de las regiones mediterráneas, en cuyo marco ha de entenderse la llegada de otros objetos de prestigio de origen griego, como la crátera de Vix, el caldero de Hochdorf o numerosas cerámicas de figuras rojas y negras. Durante las excavaciones de 1953 en la tumba de Vix se encontraron abundantes huellas de azul y rojo, éste obtenido con cinabrio (un sulfuro de mercurio) y el azul con silicato de calcio y de cobre, igual que el azul egipcio, lo que podría reforzar la impresión de que se trataba también con sustancias exóticas. En otros muchos yacimientos, sin embargo, el azul está hecho a partir de la gueda o blasto, una planta herbácea que crece en estado silvestre en numerosas regiones de Europa, cuyo principio colorante, la indigotina, se encuentra en sus hojas.

Estos tejidos de calidad cuentan a menudo con la protección de otros



4. TUMBA DE CARRO de un príncipe celta, reconstruida tras su descubrimiento en Hochdorf (Alemania), por arqueólogos del Museo de Stuttgart. En la primera Edad del Hierro, la aristocracia celta se hacía enterrar en tumbas recubiertas por un túmulo. En el interior, la cámara mortuoria, aquí representada, contenía objetos preciosos. El carro es característico de las tumbas del siglo VI antes de nuestra Era. Un nuevo estudio, publicado en 1999, muestra que el muerto y la totalidad de los objetos estaban embalados en tejidos (*arriba*).

textiles más groseros, como sucede en el caso de las joyas y de los vestidos suntuosos del príncipe de Hochdorf o de los objetos de otras tumbas coetáneas. El testimonio de la sepultura de Vix es concluyente: las cuatro ruedas del carro, desmontadas y apoyadas sobre uno de los lados de la tumba, se recubrieron en un primer momento con tejidos muy finos, asargados, con motivos de losanges, pero sólo para ser reenvueltas a continuación en sayales de lana más basta. Esta costumbre vuelve a documentarse en numerosas tumbas excavadas en Francia, especialmente en Apremont (Haute-Sâone), en Sainte-Colombe y en Trembloi (Côte-d'Or), aunque las precarias condiciones de conservación impidan contrastarlo con igual contundencia.

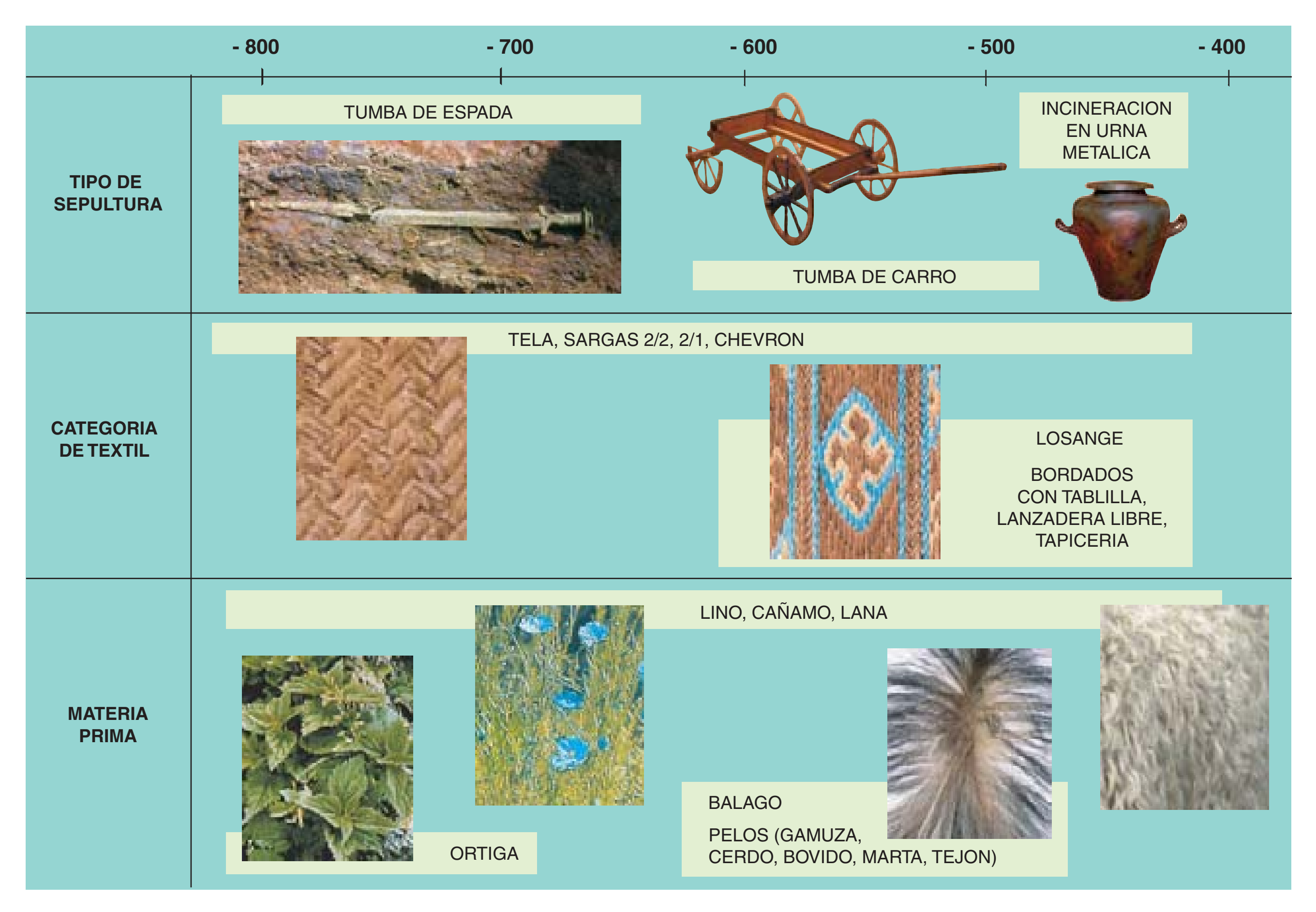
Todos estos ejemplos revelan inequívocamente la voluntad de los celtas de embalar ciertas piezas del mobiliario funerario y, a veces, hasta la totalidad del carro. En el extremo más occidental de la Europa céltica, donde se envuelven únicamente las ruedas, la cantidad y la elevada calidad de los paños utilizados son bien ilustrativas de la intención cultual de los mismos, pero también la prueba de la aparición de una nueva clase de artesanos, cuya clientela está constituida por una aristocracia deseosa de exhibir unas pertenencias excepcionales.

Estofas y urnas metálicas

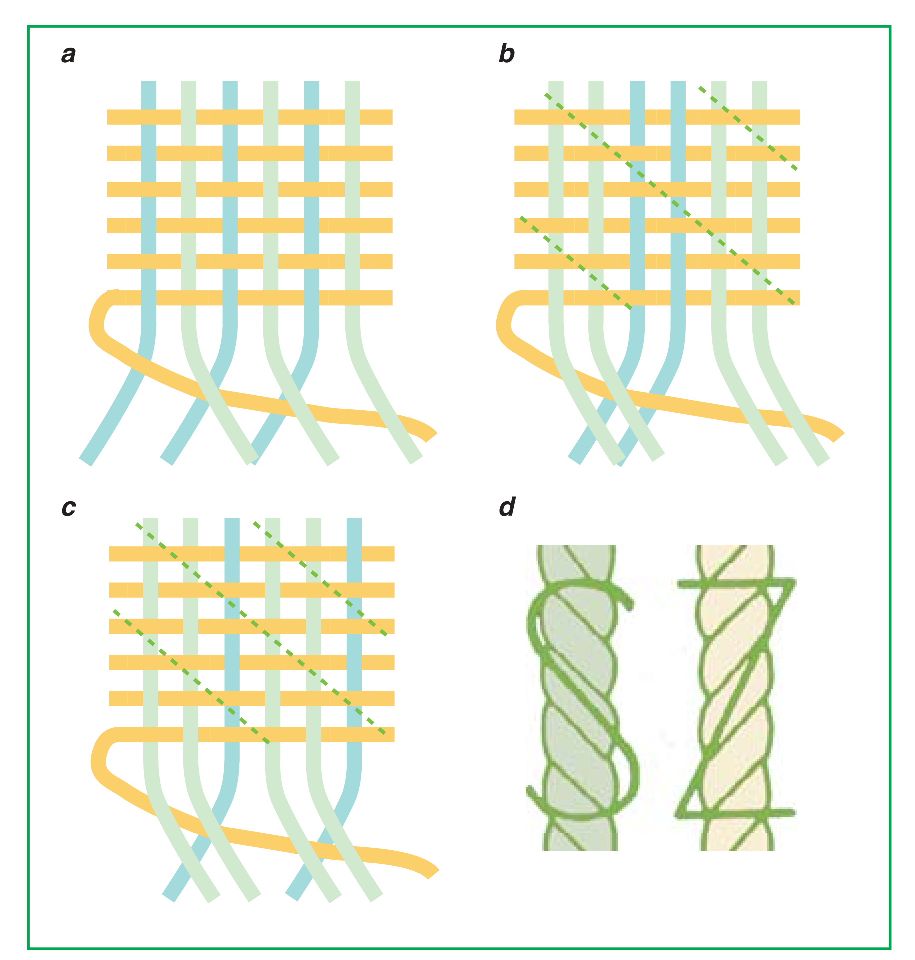
La desaparición de las tumbas de carro de cuatro ruedas, al comienzo del siglo V antes de la Era Cristiana, no dicta el fin de las sepulturas aristocráticas, sino un cambio en el ritual funerario: la incineración en urna metálica sustituye a la inhumación sobre carro. Este fenómeno aparece en el centro y este de la Galia al final del siglo VI y se perpetúa hasta la segunda mitad del siglo V, al tiempo que se extiende desde Italia a Dinamarca. Se caracteriza por el depósito de los huesos del difunto, calcinados, en el interior de un vaso metálico.

La utilización de tejidos en las prácticas funerarias tampoco es abandonada por entonces, puesto que se les encuentra asociados a la urna y a sus contenidos: bien la estofa recubre el bronce de aquélla, bien envuelve los huesos del difunto depositados en su interior. Esta práctica revela una preocupación religiosa nueva, llegada del Mediterráneo, como lo atestiguan numerosos descubrimientos efectuados tanto en Grecia como en Italia, algunos no posteriores al siglo VIII a.C.

Por su calidad y por su variedad los tejidos conservados sobre las urnas metálicas resisten la comparación con los de las tumbas de carro. Las principales armaduras son el asargado de 2/2 y, en menor medida, el asargado de 2/1 (*véase la figura 6*). Además, abundan los vestigios de



5. TRES TIPOS DE SEPULTURAS se han sucedido entre los príncipes celtas de la primera Edad del Hierro: al principio, se les enterraba con una espada, después con un carro y, por último, incinerados en una urna de bronce. Los vestigios de los tejidos que embalaban estos objetos ilustran las diferentes maneras de entrelazar los hilos que los celtas utilizaban y sobre la naturaleza de las fibras que servían para fabricar estos hilos (vegetal o animal). El cuadro cronológico da cuenta de la evolución de los tipos de sepulturas, de los textiles y de las fibras a lo largo de cinco siglos (del comienzo del siglo IX al V antes de la Era Cristiana).



6. ARMADURAS DE TEJIDO (sistemas de entrelazados de hilos). La tela es la más simple (*a*): los hilos de las tramas (horizontales) pasan alternativamente por encima y por debajo de los hilos de urdimbre (verticales). En el asargado 2/2 (*b*), la trama pasa por encima de dos estambres o hilos de urdimbre consecutivos y después por debajo de los dos siguientes con el salto de un hilo de urdimbre a cada paso de la trama. El asargado 2/1 (*c*) está hecho tomando el modelo anterior, aunque forzando el cruce de la trama por debajo de un único estambre. Las sargas presentan alineaciones oblicuas, cuya dirección se indica en línea de puntos. A la derecha, esquema de hilos encarrujados de torsión en S y Z: ambos están compuestos de dos hilos, pero su retorcimiento es opuesto (*d*); la inclinación de las espiras responde respectivamente a la de la barra mediana de las letras S y Z.

bordados realizados en telar de tablillas y sobreviven varios motivos decorativos de los períodos precedentes, como losanges y *chevrons*.

Los tejidos confeccionados con técnicas innovadoras, esto es, no acreditadas a comienzos de la primera Edad del Hierro, son más raros. Citemos la técnica de tapicería de la sepultura de Sainte-Geneviève-des-Bois, en el Loiret, y el asargado con ligaduras opuestas, consistente en que, de dos hilos de trama consecutivos, el primero pasa por arriba del estambre o hilo de urdimbre y el segundo por debajo, e inversamente en sucesivas vueltas. La utilización del kermes de origen mediterráneo para la obtención del rojo, igual que en la tumba de carro de Hochdorf, revela que los objetos de esta sepultura son también de importación. Sirvan estos ejemplos para mostrar las similitudes que existen entre las tumbas de carro y las incineraciones en urna metálica, así como la supervivencia de los contactos con el mundo mediterráneo.

Al fin de la primera Edad del Hierro, las fibras textiles vegetales comienzan a escasear frente a las de origen animal. La variedad que se encontraba en los tiempos de las tumbas de carro disminuye drásticamente; las preferencias se han concentrado en las lanas en general y en la de oveja en particular, en lo que será una tendencia cada vez más acusada a lo largo de la segunda Edad del Hierro.

El fin de una época

La primera Edad del Hierro marca la aparición de un artesanado textil de calidad superior al de la Edad del Bronce. Se caracteriza por el dominio de la técnica de los telares de tablillas y de cuatro enjulios, por la aparición de nuevas fuentes de colorantes, como el kermes, y por la utilización de nuevas fibras vegetales y de lanas diversas. A pesar de la originalidad y unidad de estilo de sus tejidos y de la riqueza y personalidad de los motivos decorativos (losanges, esvásticas...), no deja de percibirse la intensidad de los contactos, a larga y media distancia, entre el mundo céltico en formación y las civilizaciones de la cuenca mediterránea.

Este fenómeno discurre paralelo a ciertos cambios políticos y económicos de los que las prácticas funerarias de la Europa céltica transmiten también un débil pero precioso eco. Sin duda, el comienzo de la primera Edad del Hierro inaugura transformaciones importantes en el dominio de los rituales funerarios, marcadas por la utilización específica del tejido para el embalaje de los bienes más prestigiosos del difunto.

El período siguiente, la segunda Edad del Hierro, supondrá el fin de estos tejidos de excepción. En adelante, la producción textil va a limitarse a sólo telas y sargas de 2/2, realizadas exclusivamente con lana de oveja. Tales tejidos, muy simples, confieren uniformidad a una Europa céltica que se amplió al norte de Italia, al este de Bohemia y a la fachada atlántica de la Galia. Otros datos arqueológicos relativos al armamento y a los adornos corroboran estas tendencias, en lo que es, sin duda, el comienzo de una nueva historia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TISSUS ET TISSERANDS DU PREMIER ÂGE DU FER. H. Masurel, Antiquités Nationales, Mémoire 1, pág. 303; 1990.

NORTH EUROPEAN TEXTILES UNTIL AD1000. L. Bender Jørgensen, Aarhus University Press, Copenhague, 1992.

HOCHDORF IV. DIE TEXTILFUNDE AUS DEM SPÄTHALLSTATTZEITLICHEN FÜRSTENGRAB VON EBERDINGEN-HOCHDORF (KREIS LUDWIGSBURG). J. Banck-Burgess, Kommissionsverlag, Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, 1999.

PERFILES

Kate Wong

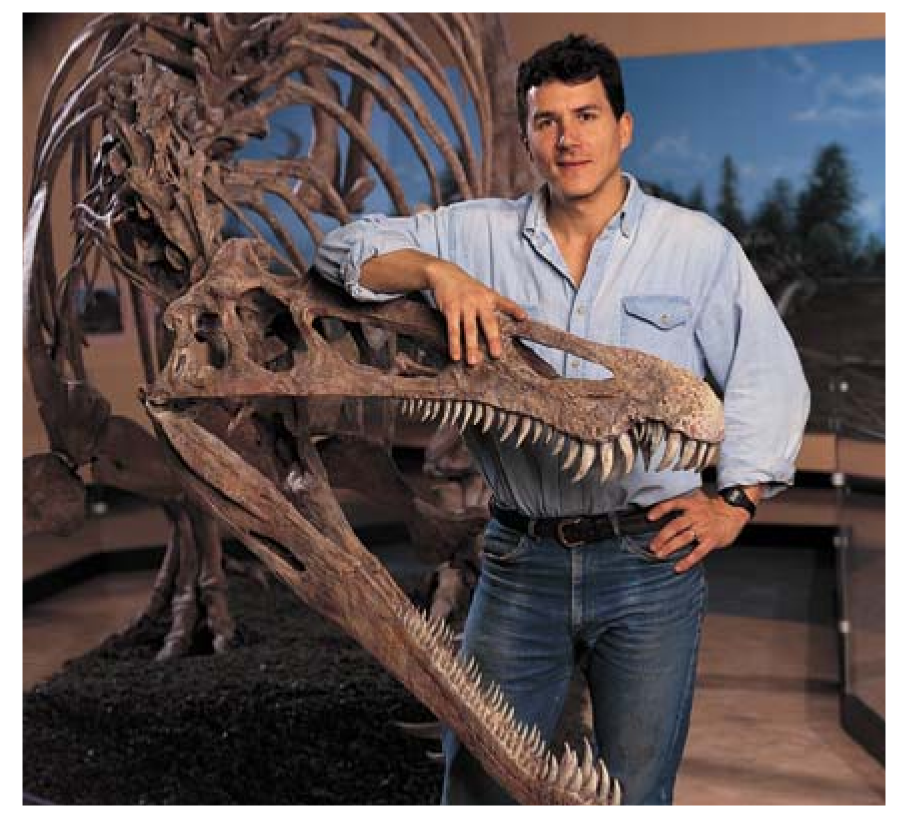
PAUL C. SERENO: La caza del dinosaurio

He llegado con antelación a la entrevista. Paul C. Sereno, paleontólogo de la Universidad de Chicago, está ocupado preparando la clase que empieza dentro de 10 minutos. Espero en silencio, distraída con los aterradores cráneos de tigres de dientes de sable, las zarpas de dinosaurio y otras curiosidades paleontológicas que descansan sobre los rimeros de libros que llenan su soleado despacho. De pronto salta de su silla, recogiendo sus apuntes y transparencias. "Ha sido una mañana loca", dice a toda prisa, y descendemos escaleras abajo como almas que lleva el diablo. Cae en la cuenta de que se ha dejado algo en el despacho, y se lanza escaleras arriba, subiéndolas de dos en dos. Vuelve a bajar en un santiamén y llegamos al aula a paso ligero.

Aunque aderezada con cierta dosis de caos, esta exuberancia de energía le ha sido útil a Sereno —que cuenta 42 años— en su prolífica carrera de cazador de dinosaurios e investigador. Ha explorado recónditas regiones de América del Sur y Africa y ha encontrado numerosos esqueletos de dinosaurio (de los cuales una docena, más o menos, corresponden a especies nuevas), descubrimientos que han aclarado los orígenes de esos reptiles y los efectos de la deriva continental en su evolución.

Sin embargo, hubo una época en que tales logros parecían poco probables. Nacido y criado en Naperville, en las afueras de Chicago, hijo de una artista y de un ingeniero industrial, Sereno fue el segundo de seis hermanos. Pero al revés que ellos, no era nada aplicado. Tanto es así que en sexto curso estuvo a punto de repetir. "No me imaginaba ni que fuera a acabar el bachillerato", confiesa.

Por fortuna, una vez que entró en el instituto descubrió algo que le gustaba, algo que se le daba bien: el arte.



1. Paul C. Sereno diseñó la montura del esqueleto de Suchomimus*, un dinosaurio depredador que descubrió en su última expedición a Níger*

Estimulado por su recién encontrada veta, maduró. "Comencé a estudiar en la hora del almuerzo para sentar las bases", recuerda. Acabó con unas calificaciones francamente superiores a las que tenía cuando entró, y fue admitido en la facultad de bellas artes de la Universidad del Noroeste.

Estudió pintura, sintiéndose atraído por el estilo minucioso de los bodegones de la escuela flamenca del XVII. Pero durante su primer año, en una visita al Museo Americano de Historia Natural, en Nueva York, acompañando a su hermano, que tenía una entrevista con vistas a una ampliación de estudios, Sereno quedó extasiado. Tras el obligado recorrido por las salas del museo sintió como una inspiración que cambió su vida. Sería paleontólogo. Combinaría arte y ciencia, viajes y aventura. "Salí del museo y les dije: el año que viene recibirán mi solicitud."

Dos años después, en 1979, Sereno entraba en la Universidad de Columbia (que está asociada con el museo), sumergiéndose en lo que acabaría convirtiéndose en una tarea para toda la vida, a saber, comprender las relaciones evolutivas (la filogenia) de los dinosaurios. Recuerda la excitación de los años ochenta, que marcaron el punto álgido de una revolución de la sistemática, cuando los investigadores empezaban a aclararse con la anatomía de esos reptiles y sus implicaciones en el árbol genealógico.

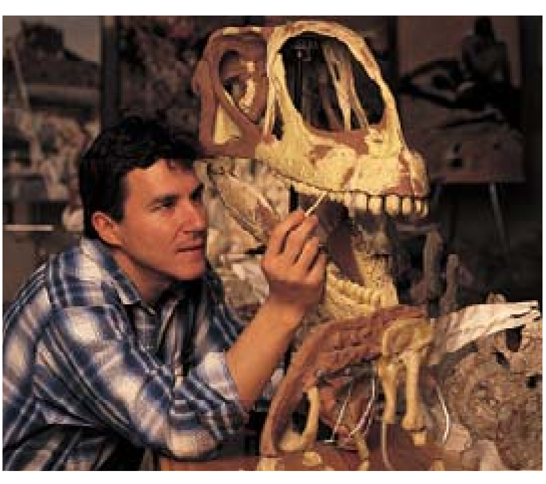
En 1988 dirigió su primera expedición, a un remoto valle argentino, en busca de dinosaurios primitivos. Después de tres semanas de excavaciones, menguados los exiguos recursos de investigación, acertó a descubrir un esqueleto que hizo que se le saltaran las lágrimas. Sobresaliendo de la roca en una pequeña arista que el equipo casi había pasado por alto se encontraba un espécimen magníficamente conservado de uno de los dinosaurios más antiguos, un terópodo de 228 millones de años adscrito al género *Herrerasaurus*. "Ni siquiera era capaz de mirarlo", recuerda, "no fuera que se esfumara." Fruto de una segunda campaña en el yacimiento fue un ejemplar más primitivo. Lo llamó *Eoraptor*.

Sereno se ganó ya cierta fama por esos primeros descubrimientos. Hoy es una autoridad en su campo. Por sus modales corteses y su buena planta ha aparecido en la portada de revistas de interés general. “La notoriedad es un arma de doble filo”, señala, apuntando que se puede comunicar lo que se está haciendo y así apoyar los proyectos de investigación. Pero también puede “provocar una reacción de rechazo en otros científicos” que sospechan que uno “se ha buscado todas las atenciones que recibe y que está dándoselas de importante”.

No va a ser fácil probar tales reticencias, teniendo en cuenta que los hallazgos de Sereno suelen salir publicados en prestigiosas revistas. Además de describir numerosos dinosaurios desconocidos, su investigación ha puesto en tela de juicio varias hipótesis relacionadas con la historia evolutiva de estos animales. Frente a la teoría aceptada de que los dinosaurios ganaron la partida a otros grupos rivales en su pugna por la dominación del mundo, propone él otra hipótesis. Tras observar que muchas de las adaptaciones que de tanta utilidad fueron para los reptiles durante su reinado ya existían millones de años antes de que se hicieran corrientes, Sereno concluyó que simplemente sacaron partido de un espacio ecológico libre. Añade que no ha encontrado ninguna prueba de que la coevolución entre depredadores y presas, o entre herbívoros y plantas con flores, estimulara la evolución de estos animales, en oposición a la tesis de la influencia determinante asignada a tales factores. El trabajo de Sereno también ha aclarado la tasa de cambio en los esqueletos de los dinosaurios, que comenzaron siendo bípedos de un metro de largo y luego se diversificaron hasta comprender cuadrúpedos de 36 toneladas.

También se muestra anhelante por examinar el corazón de dinosaurio cuyo descubrimiento se hizo público en abril. Las técnicas de diagnóstico por imagen parecen poner de manifiesto un corazón de cuatro cavidades, reforzando la idea del parentesco de los dinosaurios y las aves, amén de postular que eran de sangre caliente. No ha silenciado sus objeciones a la supuesta conservación de tejidos blandos en los sedimentos de Dakota del Sur y le gustaría examinar otros rasgos coronarios.

Las investigaciones más recientes se han centrado en los descubrimientos realizados en Africa, donde Sereno ha encabezado cuatro expediciones desde 1990. Los viajes son agotadores y con frecuencia peligrosos, porque algunos yacimientos se encuentran en regiones de inestabilidad política.



2. Sereno da los últimos toques a un sauró- podo del género Jobaria

Pero él no se arredra. “La cuestión es: ¿qué riesgo se corre allí en comparación con el peligro con que convivimos en un día normal?” Admite que el trabajo de campo no es para todos. “A mucha gente le parece algo romántico, pero cuando llevas en el Sahara un par de días el romance se acaba. Y entonces se da uno cuenta del calor que hace, y encima, ¿hay que excavar para sacar *eso*?”

“Eso”, en una expedición a Níger el año 1997, comprendía 20 toneladas de huesos correspondientes a una nueva especie de *Jobaria*, un saurópodo gigante. “El hueso llegó a estar a 66 grados C, y su calor se nos reflejaba en la cara”, recuerda, añadiendo que su equipo de 18 personas cartografió y desenterró todo el material, junto con un dinosaurio del tamaño de un *Tyrannosaurus rex* llamado *Suchomimus* y unas pocas toneladas de otras especies, estibando y desembarcando cinco veces el cargamento de 25 toneladas antes de llegar al puerto.

Se muestra particularmente satisfecho de la celeridad con la que ha sido capaz de trasladar los fósiles de los yacimientos a las publicaciones y exposiciones. “Nos trajimos todas esas piedras [de Níger] más o menos al mismo tiempo que el Museo Field [de Chicago] compró Sue, el tiranosaurio.” Pero meses antes de que Sue fuera expuesta en mayo, el equipo de Sereno había limpiado tres esqueletos (que representaban 17 toneladas de material fósil), había sacado los moldes y los había montado para exponerlos, además de publicar sus hallazgos en *Science*.

Desde luego, el brío no es la única condición. También está la enojosa cuestión de la financiación, cerrada antes de que el equipo completara los esqueletos. Por un golpe de suerte, el maratón de Chicago estaba a punto de celebrarse. Ni corto ni perezoso, se apuntó pensando en el dinero para su proyecto. Y aunque jamás había corrido ninguno, consiguió ganar el campeonato de los famosos (que también tenía en cuenta una votación por Internet) con un tiempo de tres horas y 16 minutos. La bolsa le reportó 15.000 dólares para sus dinosaurios.

Esa implicación con propuestas de parejo tenor nace de su convicción del poder de la imagen, “tan importante como la palabra escrita”. Por lo demás, se divierte en ello. Está dibujando una portada inspirada en M. C. Escher para una monografía sobre el *Eoraptor*. “Conseguí encajar la Pangea, el hogar del *Eoraptor*, entre varios *Eoraptors*”, explica entusiasmado. “He dividido el espacio de manera que al moverse en una dirección aparece el *Eoraptor*, y al moverse en la otra se ven los continentes dividiéndose. Se llama ‘*Eoraptor* y la división de una antigua llanura’.”

En su tiempo extraacadémico, se dedica a “que los chicos se tomen en serio a sí mismos”. Hace varios años él y su mujer, la educadora Gabrielle H. Lyon, fundaron una organización sin ánimo de lucro para divulgar la ciencia, llamada Proyecto Exploración, que aspira en parte a recuperar los chicos con problemas de las escuelas públicas de Chicago despertando en ellos el entusiasmo por la ciencia. Entre las actividades del grupo se cuenta una breve expedición al Oeste. Encontrarse en un lugar totalmente diferente, pensando sobre el pasado más lejano y recogiendo huesos fósiles puede ciertamente producir un gran efecto sobre los muchachos. “Viniendo de donde vengo, tengo una confianza total en la capacidad de la gente”, declara. “Estoy absolutamente convencido, absolutamente, de que la mayoría de nosotros no llegamos a descubrir el talento que tenemos porque no lo ponemos a prueba.”

Análisis de imágenes y comunidades bentónicas

Nuevas aplicaciones

Los sistemas naturales de muchas partes del planeta están sometidos a una fuerte presión antrópica. Los sistemas marinos, en particular, sufren el aumento creciente de la población en zonas costeras. Lejos de estancarse, se estima que de aquí a unos 10 años el 60 % de la población humana vivirá en la costa.

Con esa masificación se multiplican las perturbaciones en la zona costera, por ejemplo los vertidos de aguas residuales. No acaban ahí los problemas. Menos drásticos en apariencia, la sobrepesca, los efectos derivados del cambio climático y la contaminación crónica de baja intensidad pueden alterar la estructura y funcionamiento de las poblaciones marinas. Para evitar su deterioro, importa conocer los mecanismos reguladores de la dinámica del ecosistema y cuantificar la magnitud de los cambios experimentados.

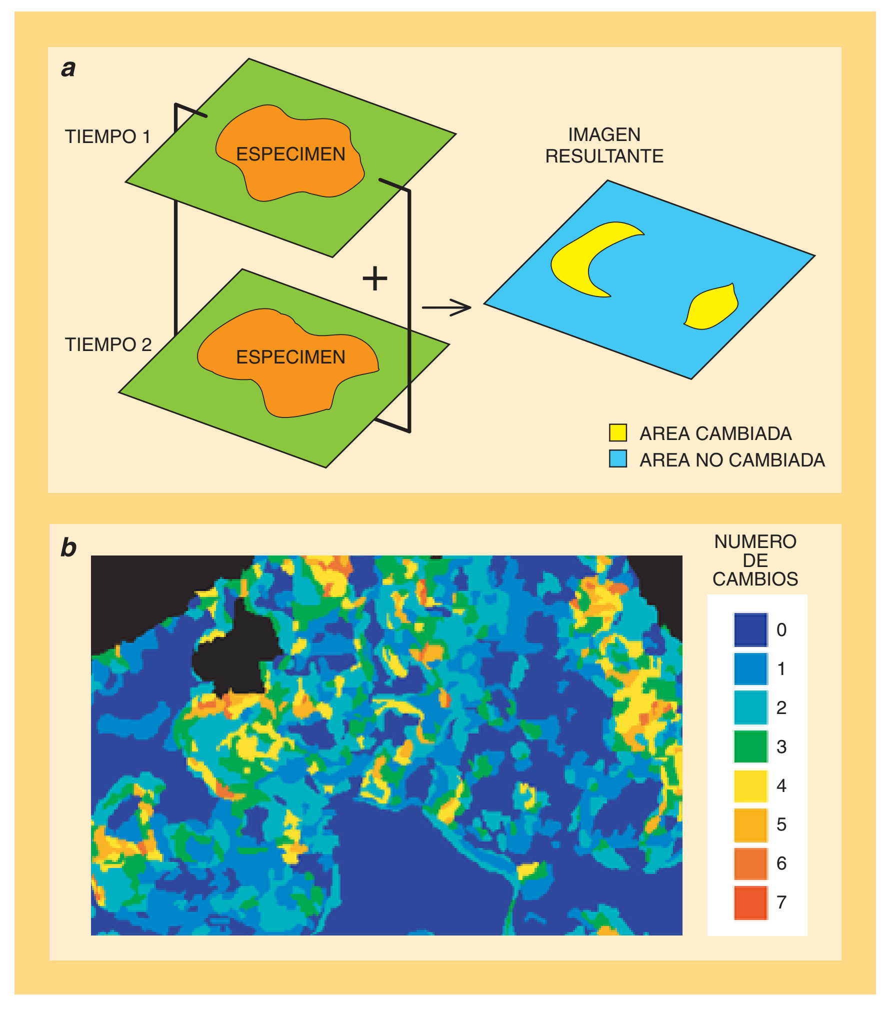
De los sistemas marinos costeros, revisten interés especial las comunidades bentónicas sobre sustrato rocoso con su característica diversidad en especies vegetales y animales sésiles. Además, ciertas especies del bentos se distinguen por su notable longevidad; no es infrecuente que la gorgonia camaleón, *Paramuricea clavata,* viva más de 30 años.

Al estar fijadas al substrato, las especies bentónicas han de hacer frente al incremento de contaminantes, carga de materiales en suspensión y cambios de temperatura operados en el medio. El seguimiento de las comunidades permite cuantificar las alteraciones y agresiones padecidas. Mediante estudios comparativos de distintas localidades y mediante la confección de series temporales amplias podemos dilucidar si los cambios observados se deben a la acción del hombre o a procesos naturales.

En los sistemas terrestres se llevan a cabo programas de seguimiento a través del análisis de las imágenes que proporcionan los satélites. La disponibilidad de imágenes de los satélites ha catalizado el desarrollo de potentes técnicas, que van desde métodos de reconocimiento semiautomatizado de los tipos de usos del suelo hasta el desarrollo de sistemas de información geográfica (SIG). Brevemente con los SIG podemos asociar de forma automática las posiciones geográficas con las características del área bajo estudio, por ejemplo su tipo de suelo, concentración de nutrientes y otros.

En el seguimiento de las comunidades bentónicas de las zonas costeras, sin embargo, el uso de imágenes de satélite se limita a la estrecha franja intermareal y escasos metros de profundidad; quedan fuera de su alcance las comunidades sumergidas. Pero si trabajamos a escala menor (de miles a unos pocos metros cuadrados), podemos aplicar los métodos analíticos al estudio de las comunidades bentónicas.

La obtención de imágenes mediante el vídeo y fotografía submarinos es común en los estudios bentónicos. En algunos casos se han acumulado series de hasta 20 años. Hasta ahora, el análisis del material fotográfico suele basarse en técnicas poco automatizadas que dificultaban la extracción de la información, debido a dos problemas principales: la segmentación de la imagen, es decir, el reconocimiento de las manchas correspondientes a cada especie, y la



Esquema del proceso de solapamiento de las imágenes correspondientes a la misma parcela (a). *Imagen resultado del solapamiento de las imágenes tomadas con frecuencia estacional durante dos años. Los colores indican el número de cambios que ha sufrido cada zona de la parcela* (b)

parametrización de los patrones espaciales y de la dinámica a partir de las imágenes segmentadas. Pero la aplicación de las metodologías desarrolladas para el estudio de los sistemas terrestres supera ambas limitaciones y se revela como una alternativa viable para el análisis de las fotografías submarinas.

Se han aplicado ya técnicas SIG para calcular la dinámica y la estructura de comunidades bentónicas mediterráneas. En nuestro caso, acotamos varias parcelas y las fotografiamos estacionalmente durante dos años. Las imágenes, segmentadas (con los contornos de cada especie reconocidos), se introdujeron en un SIG, donde se procedió a la superposición de todas las imágenes obtenidas de la misma parcela. Calculamos luego el número de cambios que había sufrido cada zona de la parcela. La comunidad estudiada presentaba unas tasas de cambio muy bajas (que se refleja en el dominio de los colores fríos), pues la integraban especies de lento crecimiento y dilatada longevidad. Había pequeñas zonas “calientes”, donde se concentraba la mayor parte del cambio cuantificado. La superposición de las nuevas imágenes permitirá detectar si en el futuro este patrón se mantiene o presenta tendencias distintas. Esta y otras muchas aplicaciones sin duda tienen que promover el desarrollo y proliferación del uso de las técnicas de análisis de imágenes en los sistemas bentónicos y ayudar, así, a su conservación.

JOAQUIM GARRABOU
Estación Marina de Endoume.
Centro de Oceanografía
de Marsella

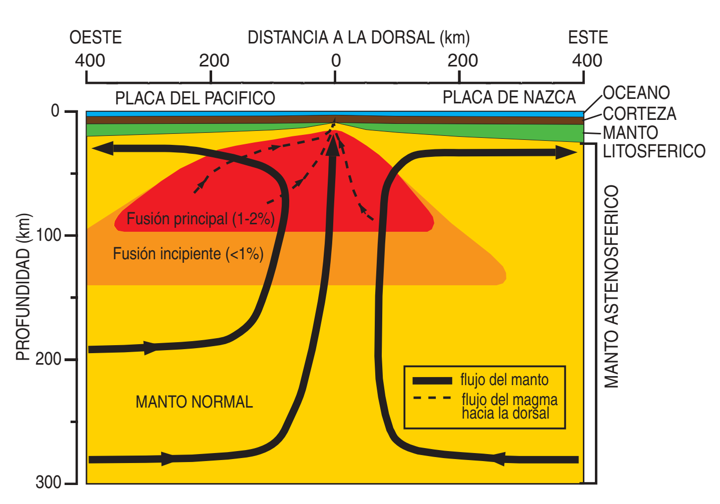
Dorsal del Pacífico Oriental

El experimento MELT

La tectónica de placas explica las observaciones geológicas concernientes al origen, evolución y futuro de la Tierra. De acuerdo con la misma, la litosfera, la capa sólida más externa del planeta y formada por la corteza y el manto litosférico, se halla fragmentada en diversas placas que flotan sobre la astenosfera y se mueven horizontalmente unas respecto a otras. Si estos movimientos son de separación, terminan por originar lo que hoy ocupa las dos terceras partes de la superficie de la Tierra: las cuencas oceánicas y la corteza que se halla en sus fondos.

Al separarse las placas, se induce el ascenso de la astenosfera para ocupar el espacio creado entre ellas. Disminuye así la presión que ejercen y promueven la fusión de una pequeña parte del material astenosférico. Este magma asciende y se acumula en cámaras de 1 km de anchura y de 50 a 100 metros de espesor, localizadas a profundidades entre 1 y 2 kilómetros bajo el fondo del océano. En esas cámaras, el magma cristaliza y, eruptado, forma la corteza oceánica, de unos 6 km de espesor medio. Los límites entre las placas divergentes a lo largo de los cuales se da el proceso descrito se denominan dorsales oceánicas, cordilleras submarinas que se extienden a lo largo de 60.000 kilómetros bajo todos los océanos del planeta.

Quedan por resolver varias cuestiones fundamentales respecto a la génesis, distribución y ascenso de los magmas bajo las dorsales. ¿Cuán ancha es la zona donde se genera el magma? ¿A qué profundidad empieza la fusión? ¿Asciende el magma en paquetes aislados o interconectados entre sí? ¿Qué mecanismo es el responsable de que todo el magma se acumule finalmente en una zona tan limitada del eje de la dorsal?



Esquema de la distribución y generación de magma bajo la dorsal del Pacífico Oriental. La zona de producción principal de magma, donde un 1-2 % de la astenosfera llega a fundirse, no sobrepasa los 100 km de profundidad, y se extiende más hacia el oeste que hacia el este de la dorsal. En trazo grueso se indican las líneas de flujo pasivo del manto; en trazo discontinuo, la trayectoria que debe seguir el magma para acumularse en cámaras magmáticas

Para responder a estas preguntas se han propuesto dos modelos principales: flujo del manto pasivo y flujo dinámico. En el primer modelo, el movimiento de separación de las placas contribuye a la generación de magma en una amplia zona a ambos lados de la dorsal. En ese marco descriptivo, el magma avanza tanto vertical como horizontalmente hacia el eje de la dorsal para concentrarse en las cámaras magmáticas.

En el modelo de flujo dinámico, el magma se genera en un canal estrecho bajo el eje de la dorsal; su movimiento es sólo vertical, a través de un manto de baja viscosidad.

Para resolver entre ambas hipótesis se realizó el Experimento Tomográfico y Electromagnético del Manto (proyecto internacional MELT), que estudiaría las propiedades elásticas y eléctricas del manto bajo una dorsal, sirviéndose de métodos sismológicos y electromagnéticos.

Se desplegaron 51 sismómetros submarinos y 47 instrumentos electromagnéticos a lo largo de dos líneas de 800 km de longitud a través de un sector de la dorsal del Pacífico Oriental, que separa la placa del Pacífico (al oeste) de la placa de Nazca (el este), a unos 4300 km al oeste de las costas del sur de Perú. Los sismómetros registraron decenas de terremotos ocurridos en todo el planeta desde noviembre de 1995 hasta junio de 1996. Analizando varias propiedades de las ondas generadas por los terremotos (tiempo que tarda la energía en viajar desde el foco hasta el receptor, la forma de la onda, división de la onda secundaria S y velocidad de fase de las ondas superficiales, entre otras), los sismólogos han determinado la cantidad de magma presente bajo la dorsal oceánica, así como su distribución espacial.

Los instrumentos electromagnéticos registraron desde junio de 1996 hasta junio de 1997 las fluctuaciones de los campos eléctrico y magnético te-

rrestres, para averiguar la resistividad eléctrica del manto, magnitud sensible a la presencia de material en estado de fusión parcial y agua, y al modo en que las bolsas de magma se conectan entre sí. La cantidad de agua presente en el manto afecta a su viscosidad, uno de los parámetros reológicos que controla la dinámica del manto.

Gracias a esos datos se sabe que el magma se encuentra distribuido de forma asimétrica respecto a la dorsal; se conoce también que se extiende horizontalmente hasta 350 km hacia el oeste y hasta 150 km hacia el este, donde el contenido de magma y volátiles en el manto es menor. La zona principal de producción de magma se encuentra confinada entre 15 y 100 km de profundidad, aunque probablemente se produce parte de fusión parcial entre 100 y 150 km de profundidad.

Asimismo, se ha determinado que en la zona de transición entre el manto superior e inferior (a 410 km de profundidad) no existen perturbaciones térmicas que puedan facilitar la fusión a esas profundidades.

Los resultados apuntan a que el magma se agrupa en bolsas alargadas e interconectadas, sin ser extremadamente finas; la cantidad de material que llega a fundirse en la zona de máxima producción es de 1-2 %. La distribución asimétrica del magma podría deberse a un flujo de retorno en el manto desde el centro del Pacífico. De ese modo, material caliente del Pacífico se transportaría a la dorsal, aumentando la temperatura y permitiendo un mayor porcentaje de fusión parcial al oeste de la misma.

Todos estos resultados indican que el modelo de flujo pasivo es el más adecuado para explicar la génesis y ascenso del magma bajo las dorsales oceánicas. Sin embargo, no descartan que exista un canal estrecho bajo el eje, donde se genere parte del magma; aunque, de existir, no podría tener más que unos pocos kilómetros de diámetro.

Las observaciones y resultados del experimento MELT deben servir para mejorar los modelos geodinámicos que tratan de explicar de forma global el comportamiento de la Tierra, desde las profundidades del núcleo hasta la superficie en que habitamos.

JUAN PABLO CANALES CISNEROS
Institución Oceanográfica
de Woods Hole
Massachusetts

Matemática

Los problemas del siglo XXI

El auditorio del Collège de France, un concentrado de talentos matemáticos, celebraba el 24 de mayo el centenario de los problemas planteados por David Hilbert en el Congreso de Matemáticos de París. Tratábase de una conmemoración solemne, y los asistentes escucharon emocionados la profesión de fe de Hilbert "...No hay *ignorabimus* en matemáticas; debemos saber, sabremos", frase que se haría célebre. Hilbert (*en el medallón*) se equivocaba, pues se ha demostrado que existen en matemáticas proposiciones indecidibles. Hilbert habría respondido que saber que no podremos saberlo todo es, por lo menos, una forma de saber.

Los 23 problemas propuestos por Hilbert han sido guía e inspiración de los matemáticos a lo largo de todo el siglo XX. Doce de ellos han sido resueltos; ocho son lo suficientemente generales para resultar todavía de interés, y una de las cuestiones no resueltas, la hipótesis de Riemann, sigue siendo el problema pendiente más importante de las matemáticas. Hilbert había dicho que, si llegara a despertarse tras dormir varios milenios, la primera cosa que preguntaría sería: ¿Ha sido demostrada ya la conjetura de Riemann?

Constituye esta hipótesis uno de los siete problemas que los consejeros matemáticos del Instituto de Matemáticas fundado por Landon Clay han seleccionado para celebrar el nuevo milenio. El matemático que resuelva uno de estos problemas recibirá una recompensa de un millón de dólares.

La tradición de ofrecer premios sobre cuestiones predeterminadas estaba a punto de desaparecer, lo que era una lástima, porque algunos de ellos han contribuido notablemente en el pasado al progreso de las matemáticas. Así, el premio del rey Oscar de Suecia, a finales del siglo XIX, vio el éxito de las ideas de Poincaré sobre el problema de tres cuerpos en interacción gravitatoria, problema que ha inspirado a numerosos continuadores de Poincaré. Las ideas matemáticas adelantadas por Poincaré conservan su vigor en la actualidad: una de sus conjeturas sigue pendiente de solución y es objeto de uno de los premios Clay. Señalemos que el mecenas real ha sido reemplazado por un industrial generoso.

En ocasiones han sido contrapuestos los matemáticos que resuelven problemas y los constructores de teorías. Así, Alexandre Grothendieck es famoso por ser un *theory builder*, un teórico, mientras que su discípulo Pierre Deligne, lo es como *problem solver*. Michael Atiyah, que al igual que los dos matemáticos citados también ha merecido la medalla Fields, ilustra la diferencia explicando que, enfrentado a un "valle matemático" que es preciso franquear, Grothendieck construye estratos de teorías hasta que el valle queda relleno por conocimientos, mientras que Deligne lanza un puente que salva el valle. La metáfora es afortunada; empero, para resolver los problemas son necesarias teorías sobre las que apoyarse, y estas teorías progresan por el esfuerzo conjunto de la comunidad matemática. Alain Connes opina que las teorías necesarias para la resolución de los problemas planteados embellecerán el paisaje matemático.

Los matemáticos, como muchos científicos, suelen preocuparse sólo por lo que les interesa. Entre los teoremas demostrados, la sociedad reconocerá los suyos, es decir, los que le son útiles; los matemáticos, sin embargo, se ufanan de su incapacidad para identificar, positiva o negativamente, las partes inútiles de las matemáticas. Su "egoísmo" produce un bien común de un gran interés social: por un milagro que nadie se explica, preocupaciones intelectuales que nada tienen que ver con la realidad fecundan las ciencias. Y todas las grandes civilizaciones han animado a los matemáticos que contribuyen a su perennidad gloriosa: los griegos han sido celebrados por su cultura y no por su éxito económico.

En el congreso de 1900 se reunieron solamente 226 matemáticos, mientras que en un congreso anual en los Estados Unidos están representados más de 5000. En 1900, la totalidad del saber matemático cabria en unos 80 volúmenes; hoy serían necesarios 10 veces más... ¿Por qué, pues, solamente siete problemas? ¿Por qué resultaba más noble limitar el número de problemas y atribuirles una gran recompensa? Un millón de dólares es una cantidad importante, y 23 millones es demasiado...

Problemas del milenio

El problema *P versus NP*

Es sábado por la noche, y usted asiste a una reunión donde hay muchos invitados. Se pregunta usted a cuántos de los presentes conoce ya. Su anfitrión le dice que sin duda ha de conocer a Julia, una señora que está junto a la mesa del fondo. Una fracción de segundo será suficiente para mirar y comprobar si es así. Por el contrario, si el anfitrión no le hubiera dicho nada, se vería obligado a dar una vuelta por la sala, mirando una por una a cada persona. He aquí un ejemplo típico que demuestra que, normalmente, el descubrimiento de una solución requiere mucho más tiempo que la comprobación de que una dada realmente lo es.

De igual manera, el hallazgo de un divisor de 13.717.421 requiere mucho más tiempo que la comprobación de que dicho número es el producto de 3607 por 3803. Los matemáticos han aislado una categoría de problemas que pueden ser resueltos en un tiempo eficaz: los llamados problemas de tiempo polinómico. El problema *P versus NP*, planteado por Stephen Cook en 1971, pregunta si en todo problema, cuyas soluciones se puedan comprobar en tiempo polinómico, se podrá descubrir siempre una solución en tiempo polinómico.

La hipótesis de Riemann

Ciertos números enteros tienen la particularidad de no ser producto de dos más pequeños (por ejemplo: 2, 3, 5, 7, ... 53, ... 1999, ... etc.) Estos números especiales se llaman números primos; desempeñan un papel muy importante tanto en las matemáticas fundamentales como en sus aplicaciones (por ejemplo, en la criptografía). La sucesión de los números primos no parece obedecer a ninguna regla; empero, su distribución en el seno de los enteros está estrechamente ligada al comportamiento de una función, la $\zeta(s)$ (léase "zeta de s") que fue descubierta por Euler. La hipótesis de Riemann afirma que las soluciones interesantes de la ecuación $\zeta(s)$ se hallan situadas sobre una recta. La hipótesis de Riemann ha sido comprobada numéricamente para las 1.500.000.000 primeras soluciones. Contiene la clave de los misterios que rodean a la distribución de los números primos.

La conjetura de Poincaré

Tracemos una curva cerrada (que no se corte a sí misma) sobre la superficie de una pelota (una esfera). Al cortar la pelota a lo largo de esta curva se obtienen dos piezas distintas. Sin embargo, no siempre es así cuando las superficies son un poco más complicadas, por ejemplo, como una cámara de neumático (superficie que los matemáticos denominan "toro"). Se dice que la esfera es simplemente conexa, mientras que el toro no lo es. Es fácil demostrar que toda superficie simplemente conexa que sea acotada (es decir, que se pueda encerrar en una caja) y carezca de borde es necesariamente la superficie de un objeto esférico. Poincaré había conjeturado que tal caracterización de los objetos esféricos seguiría siendo cierta al pasar de las superficies de dos dimensiones a los espacios de tres dimensiones.

Esta cuestión ha demostrado ser de una dificultad extraordinaria, y resiste desde hace un siglo a los esfuerzos de los matemáticos.

La conjetura de Hodge

A lo largo del siglo XX, los matemáticos han ido descubriendo métodos eficaces para describir la geometría de objetos complejos. La idea esencial consiste en preguntarse cómo reconstituir la forma de un objeto complejo ensamblando formas geométricas sencillas de dimensión creciente. Tan potente ha demostrado ser esta técnica, que ha permitido la creación de una multitud de herramientas denominadas teorías de cohomología. Gracias a ellas, los matemáticos han logrado enormes progresos en la clasificación de objetos matemáticos. Por desdicha, los orígenes geométricos de la teoría se han perdido al hacerse necesario aportar elementos que nada tienen que ver con la geometría. La conjetura de Hodge sugiere que, para ciertos tipos de espacios "elegantes" (definidos mediante ecuaciones algebraicas), los elementos denominados ciclos de Hodge pueden ser interpretados como una combinación de formas geométricas de origen algebraico.

La conjetura de Birch Swinnerton-Dyer

A los matemáticos les ha fascinado siempre el problema consistente en hallar soluciones de ecuaciones algebraicas como la $x^2 + y^2 = z^2$. El problema fundamental consiste en hallar soluciones en las que x, y, y z sean números enteros. En el caso de la ecuación "pitagórica" anterior sabemos, desde tiempos de Euclides, describir todas las soluciones, pero el problema resulta extraordinariamente difícil cuando se trata de polinomios más complicados. De hecho, Yu Matijasevich demostró en 1970 que el segundo problema de Hilbert tiene respuesta negativa; es decir, no existe un método general para saber si una ecuación de este tipo admite una solución compuesta por números enteros. Sin embargo, para una clase muy importante de ecuaciones, correspondientes a las llamadas curvas elípticas de primer género, la conjetura de Birch Swinnerton-Dyer afirma que el tamaño del grupo de soluciones racionales depende del comportamiento de una generalización de la función $\zeta(s)$ en las cercanías de $s = 1$.

Las ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes gobiernan la mecánica de los fluidos, cuyo papel es crucial en un gran número de fenómenos, que van desde el control de las turbulencias aerodinámicas a las predicciones meteorológicas.

Aunque estas ecuaciones datan del siglo XIX, apenas comprendemos sus soluciones. El problema consiste en decidir si estas ecuaciones admiten solución, y en obtener una teoría matemática rigurosa que permita explicar y predecir el comportamiento de las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Yang-Mills

Las leyes de la mecánica cuántica desempeñan en las escalas submicroscópicas un papel análogo al de las leyes de Newton, que rigen la mecánica clásica del mundo macroscópico.

Hace casi medio siglo, dos físicos, Yang y Mills, descubrieron una relación asombrosa entre la física de las partículas elementales y la geometría de los espacios fibrados. Obtuvieron una ecuación fundamental que lleva el nombre de ecuación de Yang-Mills, cuyas predicciones experimentales son comprobadas a diario en los aceleradores de partículas de todo el mundo, sea en Brookhaven, en Stanford, en el CERN o en Tsukuba. Sin embargo, no se tiene demostración matemática de la existencia de campos cuánticos gobernados por las ecuaciones de Yang-Mills, y la cuestión, esencial para la física, del confinamiento de quarks es un problema de una dificultad matemática considerable. La solución de este problema exigirá sin duda la introducción de ideas nuevas, tanto de carácter matemático como físico, y debería permitir alzar el velo que cubre uno de los grandes misterios del mundo submicroscópico.

Gases nobles

En el manto terrestre

Los gases nobles son inertes. No forman, pues, enlaces con otros elementos químicos. Algunos presentan progenitores radiactivos; es decir, sirven de geocronómetros. Estas dos propiedades confieren a los gases nobles su carácter de elementos traza perfectos en diferentes procesos geológicos.

El análisis de la concentración y de las relaciones isotópicas de muestras terrestres permite retraer hasta su origen atmosférico la historia de la desgasificación del manto. Así se ha puesto de manifiesto la estructura química interna del manto.

El manto superior ha perdido la mayoría de sus gases nobles, mientras que el manto inferior guarda todavía su conformación primitiva. Para explicar los datos obtenidos de los gases nobles, en particular de lavas de origen mantélico, hemos de conocer el comportamiento de tales gases sometidos a las presiones que reinan en el manto terrestre. En esas condiciones se producen lavas como los basaltos de las dorsales oceánicas, de origen somero en el manto superior, o los basaltos de las islas oceánicas, de origen profundo en el manto inferior.

Antes de llegar a la superficie, las lavas experimentan diversos procesos (fusión parcial, ascensión, vesiculación y otros). El principal mecanismo que determinará la concentración y la composición isotópica del material es la fusión parcial, expresada a través del coeficiente de partición del gas noble, o razón entre el líquido formado y el residuo sólido: el Kd. Todos los modelos actuales se basan en la hipótesis de un comportamiento muy incompatible de todos los gases raros, con independencia de la presión o profundidad a la que se produce la fusión parcial.

No abundan los experimentos para medir el coeficiente de partición sólido-líquido de los gases nobles. Y cuando lo hacen, los resultados muestran una gran dispersión, si no son contradictorios. Así, para unos, el argón presenta un Kd mayor que 1 y un Kd menor que 1: en unas ocasiones muestra un comportamiento compatible y en otras incompatible.

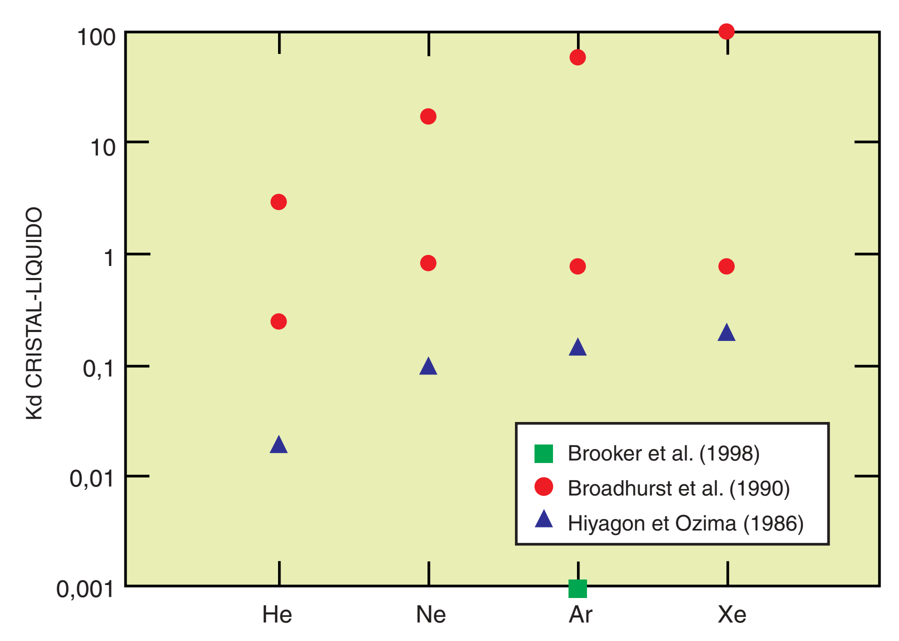
Pero, ¿por qué cuesta tanto obtener buenos datos de Kd? La razón se esconde en las ínfimas concentraciones de gas noble en los cristales. El análisis de éstas introduce un error importante en la medida del Kd. Por eso, la investigación se había limitado a la concentración de los gases nobles en los líquidos silicatados. Algunos trabajos se habían realizado incluso a altas presiones. Estos revelaban, por un lado, que la concentración de argón en los líquidos silicatados aumentaba con la presión a baja presión. Por otro lado, los estudios hechos a altas presiones, en células de diamante, mostraban un comportamiento inesperado de la solubilidad del argón en los líquidos silicatados. A presiones moderadas, la concentración de argón disminuía en cuantía importante.

Los resultados refutaban, pues, la hipótesis de un comportamiento de los gases raros independiente de la presión. Las simulaciones en dinámica molecular en la anortita líquida y el modelo de porosidad iónica reproducen los resultados obtenidos experimentalmente y prevén la presión a la que esta disminución sustantiva de la solubilidad ocurre para los otros gases nobles.

Al aumentar la presión, el número de coordinación del silicio en el líquido aumenta, al tiempo que disminuye el número de puestos vacantes para los átomos de los gases raros. Este cambio del comportamiento de los gases raros presenta consecuencias muy importantes en la geoquímica de los gases nobles. Pero si la solubilidad en los cristales no disminuye tan bruscamente, entonces el Kd debería multiplicarse por diez. El argón no sería un gas muy incompatible, sino incompatible o quizá compatible.

La geoquímica de los gases nobles, muy compleja, presenta bastantes problemas. La reinterpretación de los datos geoquímicos, teniendo en cuenta el cambio del Kd con la presión de los gases a diferentes presiones (profundidad), permitirá dar coherencia a ciertos problemas de la geoquímica actual. Por ejemplo, la paradoja de

1. Implicación de los resultados obtenidos por la autora en la desgasificación del manto, que se produce principalmente vía el volcanismo. El coeficiente de partición (Kd) de los gases nobles varía con la presión (profundidad). En el caso del argón, si la fusión parcial ocurre a baja presión, éste se concentra en el líquido. Si la fusión ocurre a alta presión (más allá de 170 km), el argón se concentra entonces en el residuo sólido. Según el modelo de porosidad iónica, la profundidad a la que se produce el cambio de Kd para cada gas noble es diferente: a más baja presión en el caso del gas que presenta el radio átomo mayor, y a más alta presión en el caso del helio. En la zona donde los cambios de Kd se producen (entre 70 y 330 km), la fusión parcial es un proceso que fracciona los gases raros



2. Coeficientes de partición cristal-líquido de los diferentes gases nobles en el sistema olivino. Cabe señalar que sólo los experimentos de H. Hiyagon y M. Ozima han sido realizados a alta presión

la concentración en gases nobles: ésta es superior en los basaltos de las dorsales oceánicas, procedentes del manto superior desgasificado, comparada con la de los basaltos de las islas oceánicas, que derivan de un manto profundo rico en gases.

La fusión parcial que da origen a los basaltos de las dorsales oceánicas se produce a poca profundidad; todos los gases nobles presentan un Kd muy inferior a 1: en cuanto se produce un líquido todos los gases se concentran en el líquido. Sin embargo, a la profundidad a la que se produce la fusión parcial de los basaltos de las islas oceánicas, los gases presentan un Kd inferior a 1 o mayor que 1; si Kd es inferior a 1, entonces la cantidad de gas contenida en el líquido dependerá del grado de fusión parcial, pero si es superior a 1, los gases nobles se quedarán en el residuo sólido. El manto inferior y una parte del manto superior pueden constituir una reserva de los gases nobles terrestres.

La técnica de la espectrometría de masas acompañada de un láser ultravioleta permite el análisis de pequeñas cantidades de gases nobles en los cristales. Nuevos experimentos de fusión parcial a alta presión que encierren pequeñas cantidades de gases nobles podrían someter a contrastación este nuevo modelo.

EVA CHAMORRO PÉREZ
Observatorio de Física del Globo de Clermont-Ferrand

Enfermedad de Huntington

Mecanismos responsables

La enfermedad de Huntington es una patología neurodegenerativa hereditaria que aparece con una incidencia de un caso por cada 10.000 habitantes en la mayoría de las poblaciones europeas. Suele presentarse en la etapa media de la vida y afecta por igual a hombres y mujeres. La enfermedad se manifiesta como una demencia progresiva, con alteraciones emocionales y movimientos involuntarios descoordinados (corea). Es muy característico de esta patología la muerte selectiva de neuronas en determinadas regiones cerebrales, especialmente en el córtex cerebral (causa verosímil de la demencia) y en el cuerpo estriado (responsable de la descoordinación motora). Los síntomas empeoran con la edad y suele producirse la muerte al cabo de unos 10 o 20 años de aparecer los primeros síntomas.

El defecto genético causante de la enfermedad de Huntington fue localizado por un numeroso equipo multidisciplinar de investigadores ("The Huntington's Disease Collaborative Research Group") en el cromosoma 4, después de un exhaustivo análisis de varios marcadores genéticos en poblaciones humanas con alta incidencia de la enfermedad. La mutación genética se encuentra en la región cromosómica 4p16.3, en un gen que codifica una proteína denominada huntingtina, cuya función era totalmente desconocida y carecía de homología con ninguna otra proteína conocida. La alteración que presentaba el gen mutado consistió en una expansión del trinucleótido CAG, de tal modo que mientras los individuos normales poseen este trinucleótido repetido entre 8 y 35 veces, los individuos que padecen la enfermedad contienen más de 36 repeticiones. Se desconoce por el momento cuáles son los mecanismos responsables de la aparición y mantenimiento de este tipo de mutaciones.

Posteriores análisis indicaron que el gen era de gran tamaño (200 Kbp), contenía 67 exones y la expansión se localizaba en el exón 1, justamente 17 codones después del codón de iniciación. Así, la huntingtina mutada contiene un número anormalmente elevado del aminoácido glutamina (ya que el trinucleótido CAG codifica glutamina) en su extremo amino-terminal, lo que de algún modo debe afectar a su funcionalidad.

También se descubrió que las neuronas espinosas de tamaño mediano, características del cuerpo estriado, poseían altas concentraciones de huntingtina. Son precisamente estas neuronas las que de modo selectivo mueren en esta región cerebral, en tanto que otros tipos de neuronas que contienen bajos niveles de la proteína no resultan afectadas. Por tanto, los mecanismos que regulan la expresión del gen podrían intervenir en el desarrollo de la patología. Actualmente, las neuronas espinosas de tamaño mediano son objeto de diversas investigaciones, encaminadas principalmente a conocer cuál es el motivo por el que este tipo neuronal es especialmente vulnerable al daño producido por la mutación.

Recientemente, diversos grupos de investigación han obtenido líneas de ratones transgénicos que llevan incorporado en su material genético la mutación característica de esta enfermedad (expansiones CAG en el gen de la huntingtina), y que presentan fenotipos neurológicos con alteraciones motoras y neuroanatómicas típicas de esta patología. Una alteración molecular observada en estos ratones es la aparición de inclusiones intranucleares que contienen la proteína huntingtina mutada en neuronas del cuerpo estriado (similares a las encontradas en biopsias de personas que padecieron la en-



Análisis de la distribución del ARNm (ARN mensajero) de la huntingtina en cerebro de ratón, realizado mediante la técnica de hibridación in situ. *Las secciones de cerebro de ratón fueron incubadas con un oligonucleótido sintético, previamente marcado con el isótopo radiactivo* ^{35}*S. Los lugares donde se produce hibridación entre el oligonucleótido y el ARNm de la huntingtina aparecen como zonas oscuras en los films de autorradiografía. Las abreviaturas indican diferentes zonas del cerebro:* cb, *cerebelo;* cx, *corteza cerebral;* hp, *hipocampo;* st, *cuerpo estriado. (El ensayo fue realizado por Emilio Casanova, del Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Universidad de León.)*

fermedad). Estos agregados presentan una estructura similar a las observadas en la fibrillas β-amiloides típicas de la enfermedad de Alzheimer y en los agregados de priones de las encefalopatías espongiformes. Aunque se desconocen los mecanismos de toxicidad neuronal resultantes, se espera que estas líneas de ratones transgénicos sean muy útiles tanto en la investigación de aspectos moleculares de esta patología como en el desarrollo de fármacos.

La enfermedad de Huntington pertenece a una familia de enfermedades neurodegenerativas producidas por expansiones de trinucleótidos, entre las que se encuentran diversos tipos de ataxias.

MIGUEL A. CHINCHETRU
Departamento de Bioquímica y Biología Molecular
Universidad de León

Lipoproteínas

Vías de síntesis

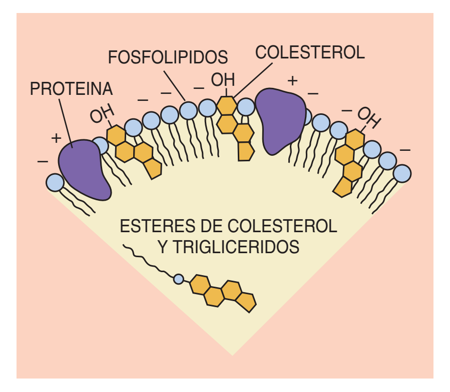
Las enfermedades cardiovasculares, primera causa de muerte en los países desarrollados, están estrechamente relacionadas con los niveles de lípidos plasmáticos, cuya acumulación progresiva en la pared interior de los vasos sanguíneos forma placas fibrosas o "ateromas" que estrechan e incluso obstruyen la luz del vaso.

Para su transporte sanguíneo en forma soluble los lípidos se asocian con proteínas específicas, las apoproteínas; con éstas forman lipoproteínas, cuyo núcleo está constituido por triglicéridos y colesterol esterificado, mientras que en la superficie hay apoproteínas, fosfolípidos y colesterol libre.

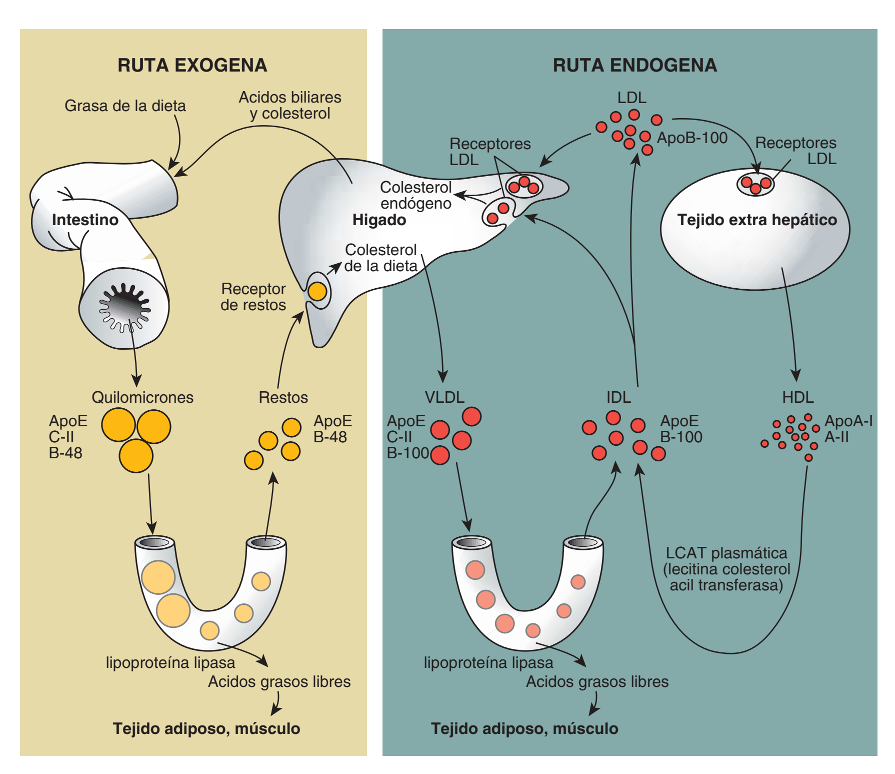
El metabolismo de las lipoproteínas suele considerarse dividido en dos grandes rutas: exógena y endógena. Los quilomicrones, principales transportadores de triglicéridos y colesterol de origen dietario, se sintetizan en el intestino, de donde pasan al sistema linfático por un proceso de exocitosis. Atraviesan el conducto torácico y llegan a las grandes venas corporales. Los quilomicrones vierten en las células su contenido en triglicéridos, que son hidrolizados por la lipoproteinlipasa. Se enriquecen así en colesterol, tornan al plasma y constituyen los quilomicrones remanentes, que van a ser degradados por el hígado.

Las lipoproteínas de muy baja densidad se forman en el hígado. Son las encargadas de transportar triglicéridos y colesterol. Una vez transferidas al plasma, esas lipoproteínas se degradan en dos etapas. En una primera de hidrolización de los triglicéridos, se originan lipoproteínas de densidad intermedia. En la segunda etapa, parte de estas fracciones ricas en apoproteína E son transportadas y reconocidas de nuevo por el hígado gracias a sus receptores específicos, mientras que la porción de lipoproteína de densidad intermedia que se enriquece en apoproteína B termina convirtiéndose en lipoproteínas de baja densidad dentro del compartimento intravascular.

Las lipoproteínas de baja densidad, principales transportadoras del colesterol plasmático hacia los tejidos, pierden la mayor parte de las apoproteínas de las lipoproteínas de densidad intermedia, salvo la apoB-100. Después de su internalización por endocitosis vierten su contenido en el interior de la célula. No tardan en degradarse sus componentes proteicos; el colesterol esterificado se hidroliza por una lipasa lisosó-



Estructura general de una lipoproteína plasmática



Modelo del transporte del colesterol y triglicéridos plasmáticos en el hombre

mica. El colesterol sobrante se reesterifica y se almacena en el interior de la célula. Las lipoproteínas de baja densidad degradadas en el hígado segregan, vía receptores específicos, su colesterol al intestino a través de la bilis.

Las lipoproteínas de alta densidad transportan el colesterol endógeno desde los tejidos al hígado. De ellas, cierta porción —las "nacientes"— se sintetizan en el hígado e intestino delgado y completan su formación en el plasma, donde experimentan unas modificaciones metabólicas enriqueciéndose con componentes obtenidos mayoritariamente en el proceso de degradación de otras lipoproteínas. Las lipoproteínas de alta densidad adquieren su colesterol de la membrana celular y lo esterifican. Desempeñan funciones antagónicas a las de baja densidad.

M.ª Flor Zafra Ortega
Dpto. de Bioquímica
y Biología Molecular
Universidad de Granada

	Qm	VLDL	IDL	LDL	HDL
DENSIDAD	<0,95	0,95-1,006	1,006-1,019	1,019-1,063	1,063-1,210
MOVIMIENTO ELECTROFORETICO	ORIGEN	PRE-β	(β)	β	α
VIDA MEDIA	1 HORA	1-3 HORAS	1-3 HORAS	2,5-3,5 DIAS	5-6 DIAS
PROT (%)	0,5-20 A-I, A-II, B-48 C-I, C-II, C-III	8 B-100, C-I, C-II, C-III, E	19 B-100, C-I, C-II, C-III, E	22 B-100, C-I, C-II, C-III,	40-50 A-I, A-II, C-I, C-II, C-III, D, E
TG	86	55	23	6	8
FL	7	18	19	22	22
CL	2	7	9	8	3-5
CE	3	12	29	42	14-17

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y Sergio Rossi

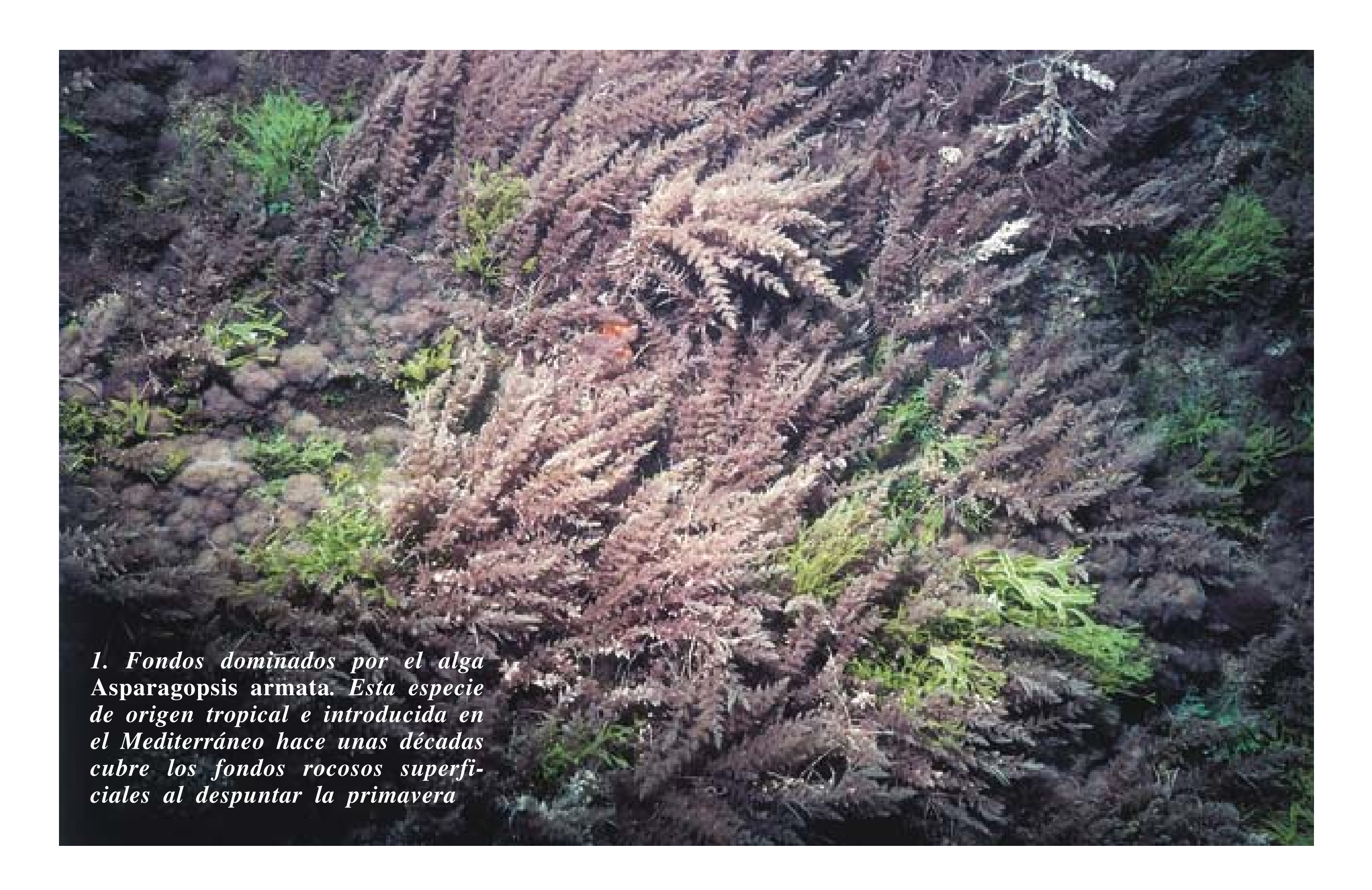
Al compás de las estaciones

El paisaje submarino mediterráneo sufre una profunda transformación a lo largo de las estaciones. Con la primavera se produce una explosión de vida vegetal, favorecida por el aumento de horas de luz y el aporte de nutrientes generados por la actividad biológica en los meses invernales.

Las primeras tormentas primaverales son el motor de una transformación paisajista que empieza con las proliferaciones de algas. Algunas se adueñan casi por completo del espacio disponible. Aparecen luego conjuntos de especies algales que dibujan un cuadro más heterogéneo y duradero, pues persisten hasta finales de verano.

Las algas recubren con sus talos el sustrato, donde se asienta el resto de los organismos vegetales y animales. Al limitar la iluminación que necesitan los primeros y la llegada de alimento que precisan los segundos, las algas frenan la actividad y la progresión de las especies que viven sobre el sustrato.

Con las tormentas de otoño y el acortamiento del día, mengua la cobertura vegetal y llenan el paisaje organismos muy variopintos que aprovechan la ocasión para crecer y multiplicarse. Proliferan los de hábito sésil: briozoos y antozoos que despiertan del letargo estival incrementando el tamaño de sus colonias.



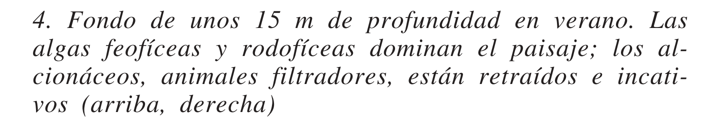
1. Fondos dominados por el alga **Asparagopsis armata.** *Esta especie de origen tropical e introducida en el Mediterráneo hace unas décadas cubre los fondos rocosos superficiales al despuntar la primavera*

2. *Fondos de algas fotófilas típicos de las costas mediterráneas durante la primavera e inicios del verano. Suelen convivir varias de esas especies amantes de la luz, que apenas dejan entrever los otros organismos de la comunidad*





3. *Comunidad superficial de invierno. La cobertura algal ha desaparecido y proliferan colonias de animales (briozoos, hidrozoos y esponjas) filtradores*



4. *Fondo de unos 15 m de profundidad en verano. Las algas feofíceas y rodofíceas dominan el paisaje; los alcionáceos, animales filtradores, están retraídos e incativos (arriba, derecha)*





5. *El mismo lugar de la fotografía precedente, iniciado el regreso de las algas. Las colonias del alcionario* Alcyonium acaule *despiertan, se expanden y despliegan sus pólipos*

Alimentación y salud de los indígenas en las colonias americanas



La salud de los indígenas americanos se resintió con la llegada de los europeos, no sólo por culpa de las enfermedades, sino también por el cambio en su dieta y condiciones de vida

Clark Spencer Larsen

La vida de los indígenas de América cambió con la llegada de Cristóbal Colón a las islas del Caribe en 1492. Los documentos escritos pintan un vivo retrato de la conquista y de las epidemias, que sembraron la muerte y la enfermedad entre la población nativa, diezmándola en poco tiempo. Hasta ayer mismo, casi todo lo que se conocía sobre las consecuencias biológicas del encuentro con los europeos se basaba en esos relatos, donde se destacaban las epidemias y la caída demográfica. Ahora bien, aunque esa documentación nos ofrece una perspectiva importante, no es la única fuente de información.

La bioarqueología, que estudia los restos orgánicos arqueológicos, está ayudando a reconstruir la vida diaria y la salud de los indígenas, en particular de quienes vivieron en las misiones españolas del sudeste, en *La Florida*. Las relaciones intensas entre los indios y los europeos empezaron en *La Florida* el año 1565, cuando Pedro Menéndez de Avilés fundó la ciudad de San Agustín en la costa atlántica del norte de Florida. Desde ese enclave, los religiosos españoles establecieron una serie de misiones entre los indios timucua y apalache de Florida septentrional y los indios guale de la costa de Georgia. En algunos asentamientos (Santa Catalina de Guale en la isla de Santa Catalina, San Martín de Timucua y San Luis de Apalache) los arqueólogos han excavado las ruinas de templos donde acudían los nuevos bautizados. La iglesia, núcleo de la comunidad, cumplía con importantes funciones religiosas entre los vivos y proporcionaba suelo para enterrar a los muertos.

Los esqueletos, desenterrados, han aportado a la ciencia un registro sorprendentemente completo de la dieta y hábitos de trabajo de los indios de las misiones. La bioarqueología añade así información al registro histórico. Nos habla de la forma en que cambió la alimentación y arroja dudas, al menos para los indios que vivieron en *La Florida,* sobre los beneficios de un modo de vida basado exclusivamente en la agricultura.



1. ***LA FLORIDA*** **era considerada por los españoles una tierra fértil de conquista. Veían en sus moradores almas que convertir y mano de obra para trabajar, sobre todo el maíz, que se convirtió en el ingrediente principal de su dieta.**

El alimento, obviamente, es fundamental para el ser humano, porque proporciona los nutrientes necesarios para el crecimiento, el desarrollo y otros procesos fisiológicos. Antes de nuestro estudio, se reconstruía la dieta de los indios de *La Florida* a partir de dos tipos de fuentes: la contabilidad de los misioneros y de otros europeos, y los hallazgos de restos de comida en los yacimientos arqueológicos. Pero, a menudo, los documentos escritos se contradicen. Algunos señalan la existencia de ganadería. Otros, como los examinados por Grant D. Jones, indican que los pueblos indígenas dependían de forma casi única de la agricultura; en concreto, del maíz.

El registro arqueológico, por su parte, tampoco tiene la última palabra. Los restos de plantas no se preservan muy bien y en las regiones costeras resultan vulnerables a la acción destructora de la humedad y de la acidez de los suelos. Sin embargo, los análisis de estos restos efectuados por C. Margaret Scarry y Donna Ruhl han demostrado que los pueblos nativos consumían numerosas especies de plantas silvestres y domésticas, antes y después de la llegada de los europeos. Queda por aclarar el empleo del maíz. En las excavaciones se han descubierto granos y mazorcas de maíz, tanto en yacimientos prehistóricos recientes como en los posteriores al contacto. Pero no conocemos la incidencia de las gramíneas en la dieta de los indígenas.

Reconstrucción de la dieta

Para resolver alguna de estas cuestiones, hemos utilizado los numerosos huesos hallados en estos yacimientos. Los tejidos de todos los seres vivos contienen isótopos estables de algunos elementos, como el carbono y el nitrógeno; podemos, pues, medir la concentración de estos elementos en los huesos y aprovechar esa información para reconstruir su dieta. Las diferencias en la relación entre dos isótopos de carbono, carbono 12 y carbono 13, indican el tipo de plantas que un individuo consumía. La mayoría de las plantas se pueden dividir en dos tipos: plantas C3, que fijan el dióxido de carbono por incorporación inicial de tres carbonos, y plantas C4, que incorporan cuatro. La distinta señal química de las plantas C3 y C4 que consume una persona queda reflejada en sus huesos. Casi todas las plantas que se consumían en *La Florida* eran de tipo C3, incluidas las frutas, el trigo, las bellotas y las nueces. La única planta de tipo C4 que comía la población indígena era el maíz.

Los isótopos de nitrógeno nos aportan otro tipo de información. Los huesos de peces y las conchas de ostras de los yacimientos arqueológicos indican que los guale y otros pueblos indígenas de la región se alimentaban de productos de origen marino con regularidad, antes y después de la llegada de los europeos. Las algas marinas y las plantas terrestres contienen distintas proporciones de dos isótopos estables de nitrógeno (nitrógeno 14 y nitrógeno 15). Por tanto, la relación entre estos dos isótopos en una persona que consume alimentos de origen marino difiere de otra que se alimenta con productos de origen terrestre.



TERRITORIO BRITANICO
APALACHES
GUALE
TIMUCUA
Santa Catalina de Guale (St. Catherines Island)
Santa Catalina de Guale de Santa María (Amelia Island)
San Agustín
San Luis de Apalache
San Martín de Timucua
LA FLORIDA

2. LAS MISIONES ESPAÑOLAS, como la de San Luis de Apalache (*a la izquierda*), se establecieron a lo largo de la costa de las actuales Florida y Georgia. Destinadas a tres tribus principales (guale, apalache y timucua), estas misiones se convirtieron en centros de la vida social y religiosa.

Comparando las diferencias en los índices de los isótopos de carbono y nitrógeno que contienen los huesos, antes y después de la llegada de los europeos, hallamos un cambio importante en la dieta de los indios. Junto con Margaret J. Schoeninger, Nikolaas J. van der Merwe y Lynette Norr hemos descubierto que tales diferencias siguen un patrón geográfico y cronológico. Como era presumible, los pueblos costeros consumen muchos más alimentos marinos que los del interior, sin que influya su época. Los indios guale de las islas de Santa Catalina y de Amelia se alimentaban de maíz antes y después de la llegada de los misioneros. Pero durante la época de la cristianización lo consumían en mayor proporción que sus antepasados. El mismo fenómeno se repitió con apalaches y timucuas.

Las consecuencias del maíz

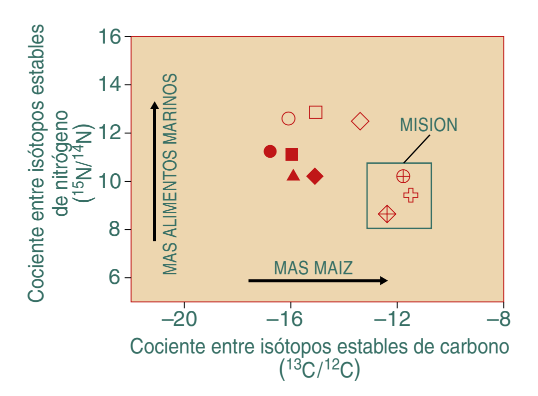
Del examen químico de los huesos se desprende, pues, que la dieta de los indios cambió tras la llegada de los europeos. Pero el cambio no fue para mejor. Una dieta variada, rica en productos del mar y diversidad de plantas y animales, se sustituyó por una dieta homogénea y menos nutritiva, que dependía del cultivo casi exclusivo del maíz.

La alimentación basada en el maíz es muy pobre. Esta gramínea contiene gran cantidad de azúcares, causante de la caries y de la mala salud bucal. También contiene fitina, un compuesto químico que se une al hierro, cuya absorción corporal inhibe. Por eso las poblaciones que consumen mucho maíz muestran una predisposición a la anemia y a otras consecuencias de la falta de hierro [*véase* "Carencia de hierro", por Nevin S. Scrimshaw, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1991]. Para empeorar las cosas, se frenan el crecimiento y el desarrollo, porque el maíz es una fuente muy pobre en calcio y niacina, o vitamina B_3, necesaria para el metabolismo. Y constituye también una fuente inadecuada de proteínas; según la variedad a que nos refiramos, el maíz es muy deficiente o carece por completo de tres de los ocho aminoácidos esenciales: lisina, isoleucina y triptófano.

Por esa razón, la caries se daba con mayor frecuencia y en mayor número entre los indios de las misiones que entre sus antepasados. La consistencia del alimento favorecía, asimismo, la propensión a las enfermedades bucales. Las comidas blandas, como las gachas de maíz, predisponen a la formación de placa dentaria y bacterias de la caries. Observando el desgaste dentario con el microscopio electrónico de barrido, el grupo de Mark F. Teaford ha demostrado que los alimentos consumidos por los indios de la colonia eran más blandos que los que consumían sus antepasados. Se advierte en la reducción de algunas marcas en la superficie de los dientes, como son las señales y estrías provocadas por el consumo de comidas duras y sin elaborar.

Esa pauta general muestra diferencias interesantes de un sitio a otro. En colaboración con Bonnie G. McEwan analizamos dientes procedentes de la misión de San Luis. Más tarde, Tiffiny A. Tung reveló que la población de esta misión tenía menos caries que sus homólogos de otros yacimientos. Diferencias del patrón habitual que encuentran explicación tras la investigación de Elizabeth J. Reitz, quien estudió los restos de animales del mismo yacimiento. Reitz descubrió que las gentes de San Luis consumían carne de vaca —un complemento infrecuente en la dieta estándar de los indios de las misiones—, cuyas proteínas pudieron inhibir la formación de caries.

A partir de los dientes podemos extraer otro tipo de datos. Hutchison y yo hemos observado que muchos indios tenían hipoplasias: líneas visibles en los dientes causadas por enfermedades o malnutrición. El desmesurado tamaño de las hipoplasias sufridas por algunos indios indica que sufrieron



3. LA RELACION ENTRE ELEMENTOS químicos, como los isótopos de carbono y nitrógeno, nos proporciona información sobre la dieta. En los huesos queda registrada la diferencia de esta relación que indica el tipo de plantas y la cantidad de alimentos de origen marino que consumían.

Señales de estrés en el esqueleto

Hipoplasia

Las líneas de los dientes de los indios de la colonia son señal inequívoca de enfermedad y malnutrición.



Microdesgaste dentario

La superficie dentaria de los indios de las misiones es más lisa (*a la izquierda*) que la de sus antepasados (*a la derecha*). De ello se deduce que la dieta de los primeros se basaba en alimentos blandos, como son las gachas de maíz, causantes de la placa bacteriana de la caries.





Osteoartritis: desgaste articular

El excesivo desgaste se advierte en diversas partes del esqueleto. El pulido de las articulaciones indica que el cartílago se desgastó y la superficie articular se deterioró.



Osteoartritis: labiación

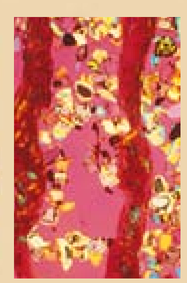
Las vértebras de la zona lumbar de muchos indios de las misiones presentan bordes labiados, una distorsión causada por cargas pesadas. La frecuencia de labiación y de desgaste articular manifiesta que muchos trabajadores adultos sufrieron algún tipo de osteoartritis.



Anemia e hiperostosis porótica

El maíz contiene fitina, que inhibe la absorción de hierro. Como resultado, muchos padecieron anemia y sus huesos presentan lesiones con aspecto de criba que pueden observarse en el cráneo, a través del microscopio. En individuos no anémicos las bandas oscuras serían más anchas que las mostradas aquí (*a la derecha*). (Estas lesiones también pueden ser el resultado de una infección parasitaria.)





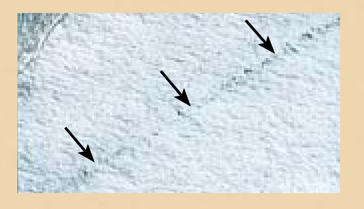
Caries dental

La caries era frecuente entre los indios que consumían mucho maíz; esta gramínea favorece las enfermedades dentales.



Líneas de Retzius

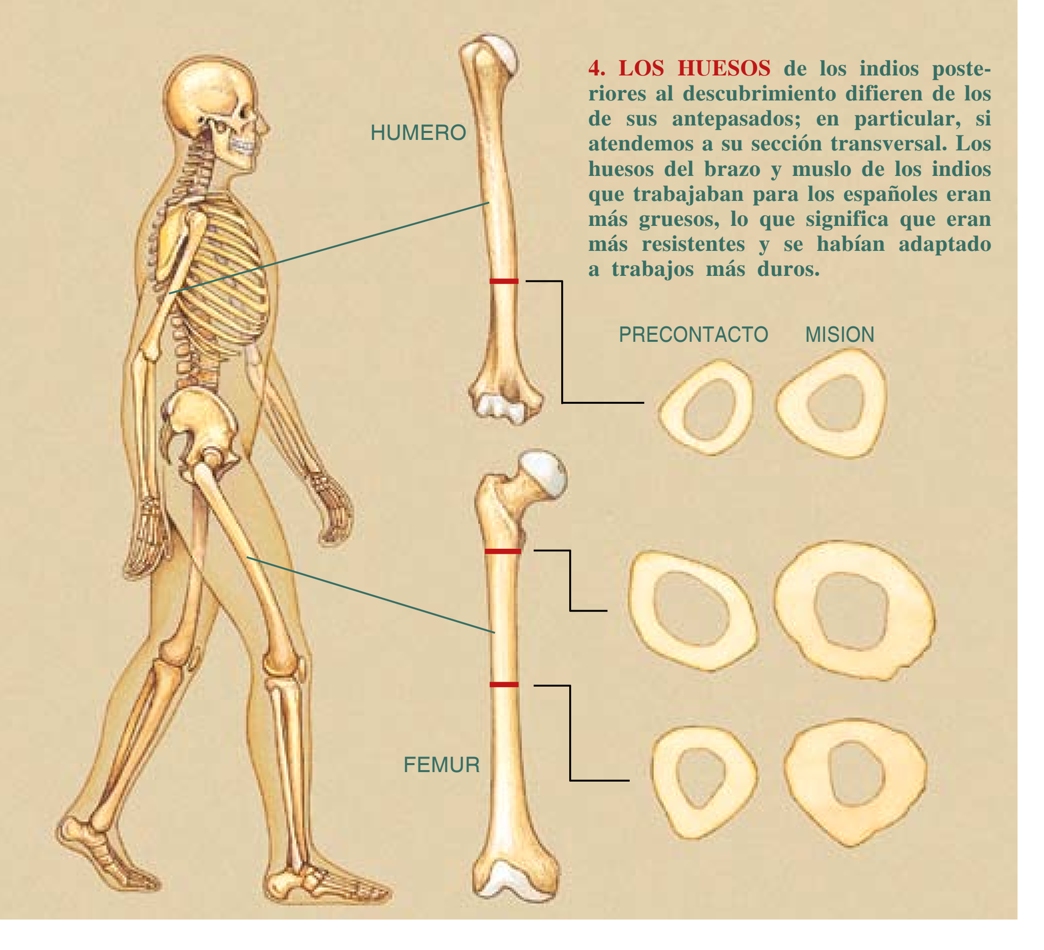
Estas líneas de crecimiento pueden observarse en el esmalte dental. Muchos indios de las misiones tienen bandas oscuras, reflejo de una alimentación escasa y de patologías frecuentes.



Infección

Tibias y peronés muestran lesiones patentes, causadas por infecciones bacterianas.





4. LOS HUESOS de los indios posteriores al descubrimiento difieren de los de sus antepasados; en particular, si atendemos a su sección transversal. Los huesos del brazo y muslo de los indios que trabajaban para los españoles eran más gruesos, lo que significa que eran más resistentes y se habían adaptado a trabajos más duros.

enfermedades muy graves o crónicas, una mala nutrición o ambas. También hemos hallado pruebas de interrupciones en el desarrollo dentario. Junto a Scott W. Simpson acometimos el estudio de rasgos microscópicos de los dientes y nos fijamos en las líneas de Retzius (líneas de crecimiento que aparecen en el esmalte). Tanto los indios precolombinos como los de las misiones tienen líneas de Retzius anormales, pero estas malformaciones son más frecuentes en los segundos.

Considerándolas junto a otros indicios, el incremento de las anomalías en las líneas de Retzius pone de manifiesto que la dieta pobre no era el único problema de los indios de las misiones. David Hurst ha excavado un pozo somero y cubierto de tablones en Santa Catalina de Guale, que sería un auténtico foco de parásitos. Aunque sus antepasados bebían agua dulce de arroyos y manantiales, los indios de las misiones se abastecían de la remansada en pozos. Todos los que viven ahora en la zona conocen los peligros que comporta el beber agua de pozos someros: se contamina con mucha facilidad y provoca infecciones parasitarias y otros trastornos.

La existencia de una infección generalizada se patentiza en los dientes estudiados; la mayoría de los que portan esmalte defectuoso se formaron durante los dos primeros años de edad. En ese lapso, la deshidratación por diarrea infantil constituye una de las principales amenazas de la salud. Una deshidratación aguda puede inhibir la función de todas las células, incluidas las responsables de la formación de esmalte o ameloblastos. Igual que acontece hoy en los países poco desarrollados, las bacterias y virus presentes en la comida y agua contaminada causan la diarrea infantil. En la misión se darían, a buen seguro, las condiciones desencadenantes de diarrea infantil y del patrón de anomalías en el crecimiento que hemos observado en los dientes.

La viruela y el sarampión pudieron propagarse sin dificultad con el agrupamiento de los indios en torno a las misiones. Muchas de las enfermedades infecciosas graves provocan la muerte antes de interesar los huesos. Pero algunas infecciones, como la causada por la bacteria *Staphylococcus aureus*, pueden pasar de los tejidos blandos al hueso más próximo, produciendo lesiones evidentes. En numerosas tibias pertenecientes a indios posteriores al contacto se evidencian las lesiones de esa infección.

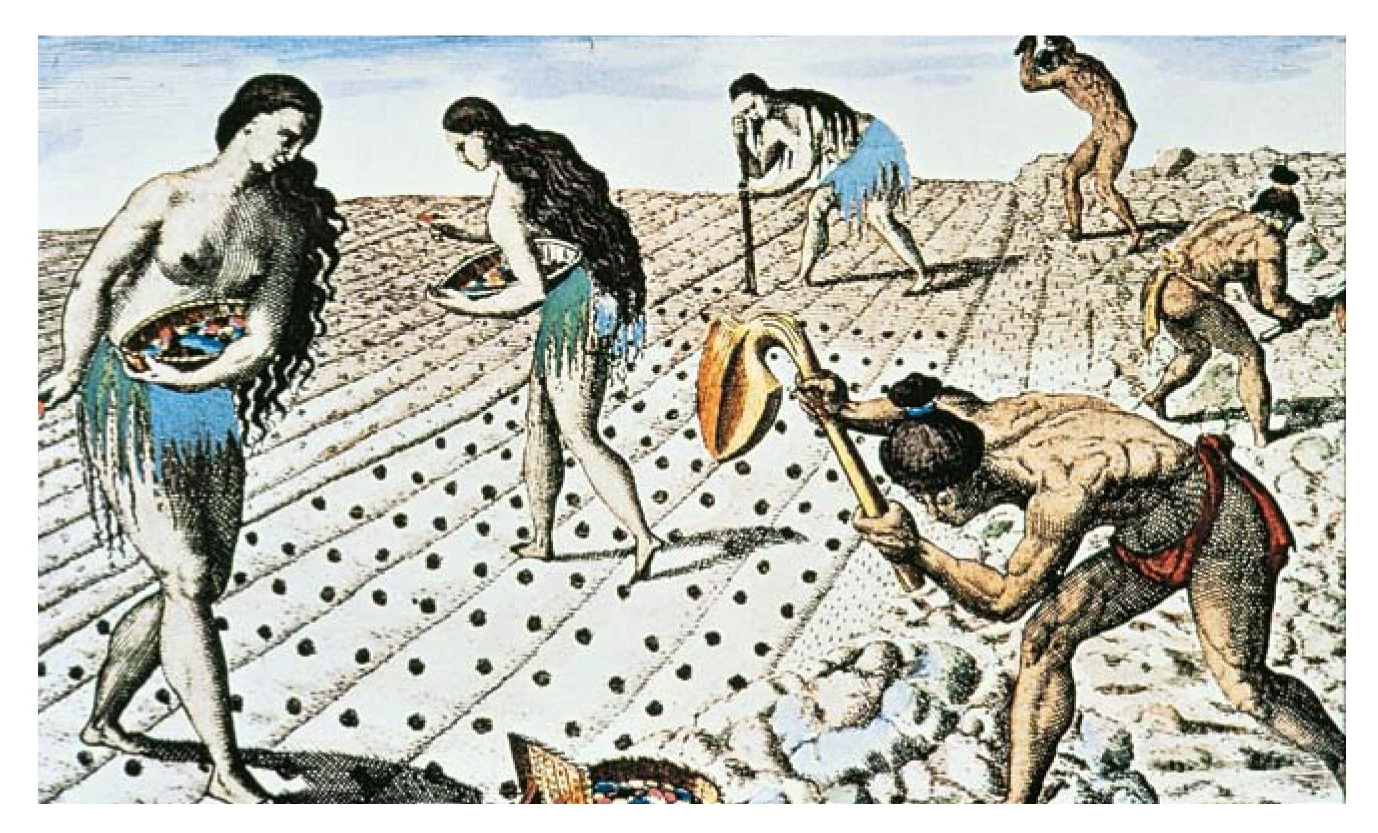
La infección puede provocar anemia si los parásitos, los anquilostomas por ejemplo, producen hemorragias. El estudio de los huesos de las misiones confirma la regularidad de las infecciones. Muchos presentan lesiones en forma de criba —denominada hiperostosis porótica— causada por un déficit de hierro, por el escorbuto o por alguna infección. Pocos indios precolombinos tenían estas lesiones, probablemente porque su dieta conjunta de pescado y maíz les proporcionaba suficiente hierro para evitar la anemia. La frecuencia de hiperostosis porótica en los indios de la colonia fue, probablemente, resultado conjunto de la anemia producida por una dieta de maíz y por las infecciones intestinales.

La alimentación y las condiciones de vida de esos indios no fueron los únicos aspectos culturales que sufrieron vuelcos tan drásticos. En *La Florida* los españoles practicaban el sistema de repartimiento. Todos los varones útiles eran requeridos para trabajar en los campos, en obras públicas y en tareas coadyuvantes del ejército. También se les empleaba para transportar cargas pesadas a través de largas distancias; los animales de tiro no se introdujeron en la región hasta 1680. El examen de los esqueletos nos enseña que los indios de las misiones sufrieron un porcentaje más alto de osteoartritis que sus predecesores. Atribuimos ese fenómeno al incremento del trabajo, dado que el desgaste y esfuerzo articular son causa de osteoartritis. Pero también está relacionado con otros factores. Decidimos, pues, ahondar en la investigación.

Huesos en acción

El esqueleto de una persona viva refleja su actividad física. Durante la vida de una persona los huesos cambian de forma y estructura en respuesta a las fuerzas mecánicas experimentadas. En esencia, se forma tejido óseo allí donde el esqueleto lo necesita. Si una persona camina o permanece de pie, las fuerzas que producen la tensión muscular o el peso corporal desencadenan la actividad celular en el hueso que remodela el esqueleto. Sin la cantidad apropiada o su justa distribución en los puntos necesarios, las tensiones o torsiones rompen el fémur.

CLARK SPENCER LARSEN dirige el proyecto de bioarqueología en La Florida, en el que colaboran expertos de los Estados Unidos y de otros países. Doctor en antropología biológica por la Universidad de Michigan, Larsen da clases en la de Carolina del Norte en Chapel Hill.



5. LA AGRICULTURA de los indios de las misiones, como entre los timucua que aparecen en este grabado del siglo XVI, se incrementó tras la llegada de los españoles. Un cambio que no benefició a los indígenas de *La Florida*. La agricultura obligó a simplificar su alimentación y se resintió su salud.

Apoyados en métodos de ingeniería mecánica para medir la resistencia en los materiales de construcción, Christopher B. Ruff y el autor analizaron la resistencia de fémures y húmeros hallados en yacimientos anteriores al descubrimiento y en las misiones de *La Florida*. Había que calcular los momentos de inercia del área, propiedades geométricas de la sección transversal de los huesos. Los momentos de inercia reflejan la distribución del hueso en sección transversal e indican la tensión o capacidad de resistencia a la rotura durante la flexión o la torsión. En ese análisis se exige trazar el contorno de los perímetros externo (subperiostio) e interno (cavidad medular) de la sección del hueso y calcular sus propiedades biomecánicas.

Descubrimos que los indios de las misiones tenían huesos más resistentes que sus predecesores. Los primeros presentaban momentos de inercia de área mayores que los huesos más antiguos. Lo que no debe interpretarse como si los huesos de los indios de las misiones fuesen mejores que los de sus antepasados; significa sólo que los huesos estaban adaptados a las nuevas necesidades mecánicas. Habida cuenta de las circunstancias de explotación y de trabajo intenso de los indios de la colonia, el incremento de la resistencia de los huesos y la osteoartritis debieron de obedecer a una alteración fundamental en su forma de vida y actividad física redoblada.

La información que aporta la bioarqueología confirma en buena medida lo transmitido por las fuentes escritas, incluidos los trabajos agotadores y las enfermedades padecidas. Pero nos proporciona también un retrato más global y preciso de nuestro pasado. El contacto con los europeos les acarreó múltiples problemas de toda índole. Las enfermedades, la malnutrición, el déficit de hierro, las interrupciones del crecimiento, las infecciones y los trabajos pesados se cobraron sus víctimas. Mas, a pesar de esas calamidades, los pueblos indígenas terminaron por adaptarse a los cambios y a las nuevas exigencias. Un episodio que se ha repetido una y otra vez en la historia de nuestra especie.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ARCHAEOLOGY OF MISSION SANTA CATALINA DE GUALE, VOL. 1: SEARCH AND DISCOVERY. David Hurst Thomas en *Anthropological Papers of the American Museum of Natural History*, vol. 63, parte 2, páginas 47-161; 12 de junio, 1987.

THE ARCHAEOLOGY OF MISSION SANTA CATALINA DE GUALE, VOL. 2: BIOCULTURAL INTERPRETATIONS OF A POPULATION IN TRANSITION. Dirigido por Clark Spencer Larsen en *Anthropological Papers of the American Museum of Natural History*, n.º 68; 1990.

IN THE WAKE OF CONFLICT: BIOLOGICAL RESPONSES TO CONQUEST. Dirigido por Clark Spencer Larsen y George R. Milner. Wiley-Liss, 1994.

THE APALACHEE INDIANS AND MISSION SAN LUIS. John H. Hahn y Bonnie G. McEwan. University Press of Florida, 1998.

REGIONAL VARIATION IN THE PATTERN OF MAIZE ADOPTION AND USE IN FLORIDA AND GEORGIA. Dale L. Hutchinson, Clark Spencer Larsen, Margaret J. Schoeninger y Lynette Norr en *American Antiquity*, vol. 63, n.º 3, págs. 397-416; julio 1998.

SKELETONS IN OUR CLOSET: REVEALING OUR PAST THROUGH BIOARCHAEOLOGY. Clark Spencer Larsen. Princeton University Press, 2000.

Origen de los Amerindios

Los estudios con marcadores genéticos del cromosoma Y han demostrado que los Amerindios comparten un cromosoma fundador, cuyo origen los autores sitúan en Siberia central

Sergio D. J. Pena y Fabrício R. Santos

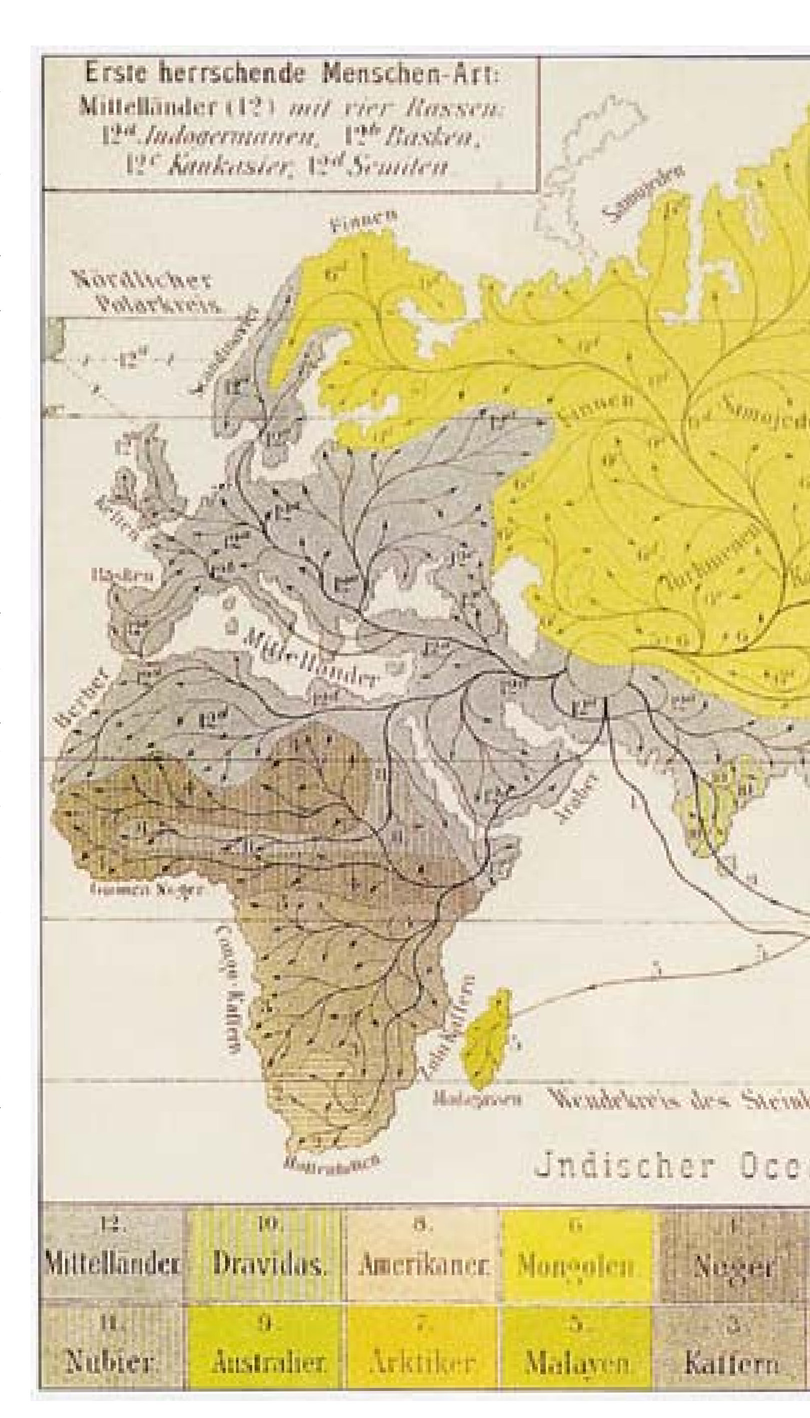
Cuando los europeos llegaron a las Indias occidentales, a finales del siglo XV, se encontraron con pueblos no mencionados en el Antiguo Testamento. En un comienzo, los supusieron descendientes de alguna de las tribus de Israel perdidas. En 1590, el jesuita José de Acosta sugería, en su *Historia Natural y Moral de las Indias*, que aquellos indígenas procedían de cazadores que habrían venido de Asia a través de un puente de tierra con América del Norte.

La idea fue ganando paulatina aceptación entre la comunidad científica. Cuatrocientos años más tarde, Ernst Haeckel, en su *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, publicado en 1884, no sólo reafirmó la asociación entre nativos americanos y pueblos asiáticos, sino que propugnó también el origen de los Amerindios a partir de poblaciones arcaicas de Siberia.

En su formulación moderna, la teoría del origen de los nativos americanos propone que sus antepasados llegaron por Beringia, un puente de tierra tendido entre 40.000 y 13.000 años atrás, cuando las glaciaciones rebajaban el nivel de mar. Beringia constituía una región entre América del Norte y Siberia, donde actualmente se sitúa el estrecho de Bering. En aquel tiempo el clima era mucho más frío que ahora y los imponentes glaciares del este y oeste formaban una enorme placa de hielo, casi continua, que cubría el Canadá. Hay pruebas de que hace unos 14-15.000 años los glaciares comenzaron a derretirse y se abrió un paso por donde pudieron haber transitado los Amerindios en dirección sur. Cabe también la posibilidad de que bajaran navegando a lo largo de la costa del Pacífico.

En cualquier caso, contamos con sólidos indicios de que, 10.000 años atrás, el hombre ocupaba las tres Américas, hasta la misma Patagonia, una extensión superior a los 16.000 Km.

Existen tres grupos lingüísticamente distintos de nativos americanos: los Amerindios (la gran mayoría, dispersos por todo el continente y que son el objeto de nuestro artículo), los Na-Dene (en el oeste de América del Norte; a ese grupo pertenecen Apaches y Navajos)



1. MAPAMUNDI DE ERNST HAECKEL. Publicado en 1884, en él se propone el origen monofilético de la humanidad a partir de una región hipotética llamada Lemuria, en el océano Indico. Según la teoría más aceptada hoy, *Homo sapiens* tiene un origen monofilético y procede de Africa (teoría “out-of-Africa”). Existen pruebas sólidas de una migración humana desde Asia hacia el continente americano.

y, por último, los Aleutas-Esquimos (en el norte de América del Norte).

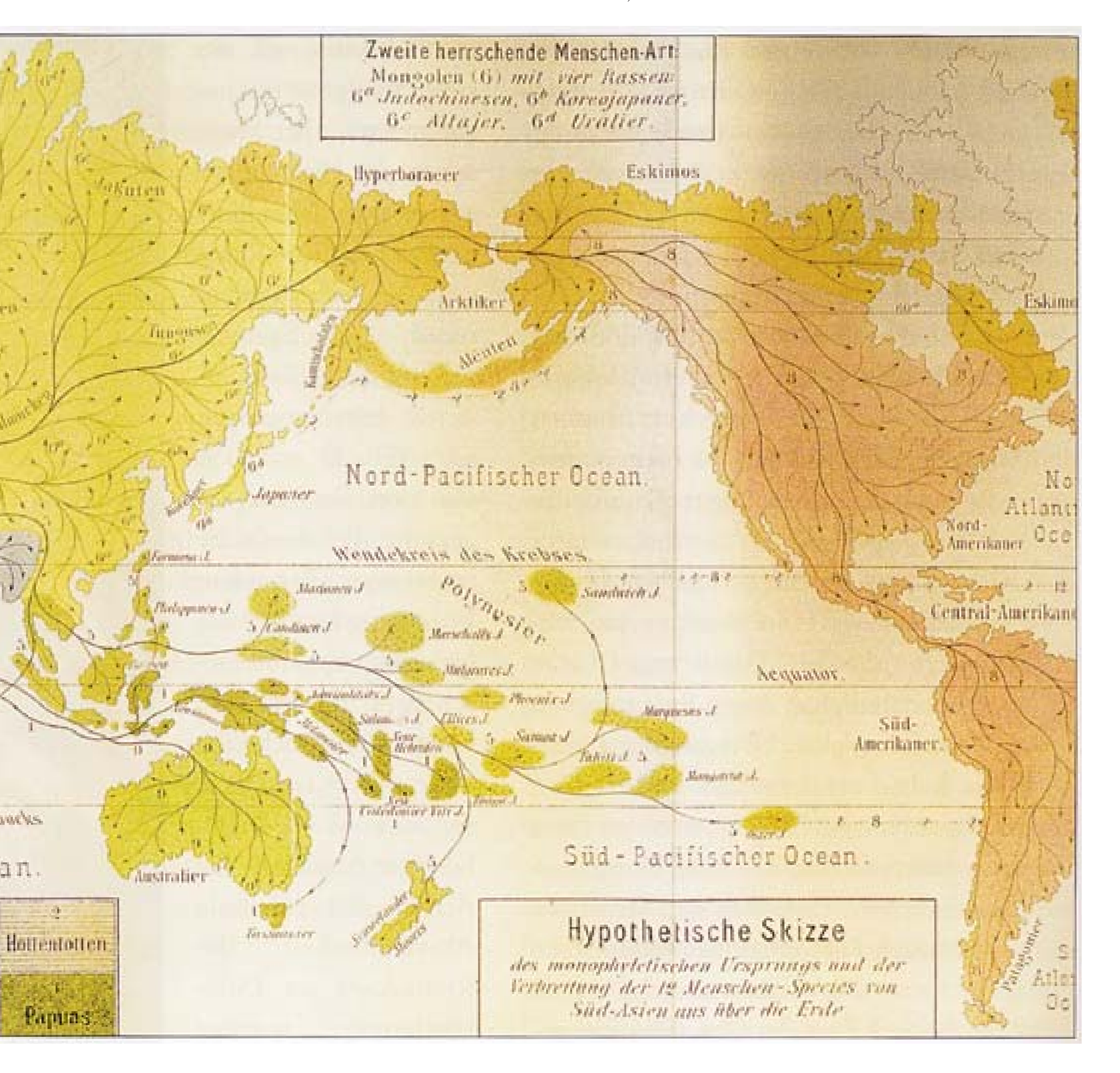
Mucho se ha investigado y escrito sobre la población precolombina de las Américas, pero no se han resuelto todavía cuestiones fundamentales. ¿Procedió de forma continua o en oleadas distintas la migración? ¿Cuántas olas migratorias se produjeron? ¿Cuándo ocurrieron tales movimientos? ¿De dónde partieron? ¿Qué migraciones produjeron qué poblaciones actuales? ¿Se extinguieron grupos responsables de algunas migraciones? Las preguntas se suceden sin tasa y no sabemos si habrá respuesta para todas.

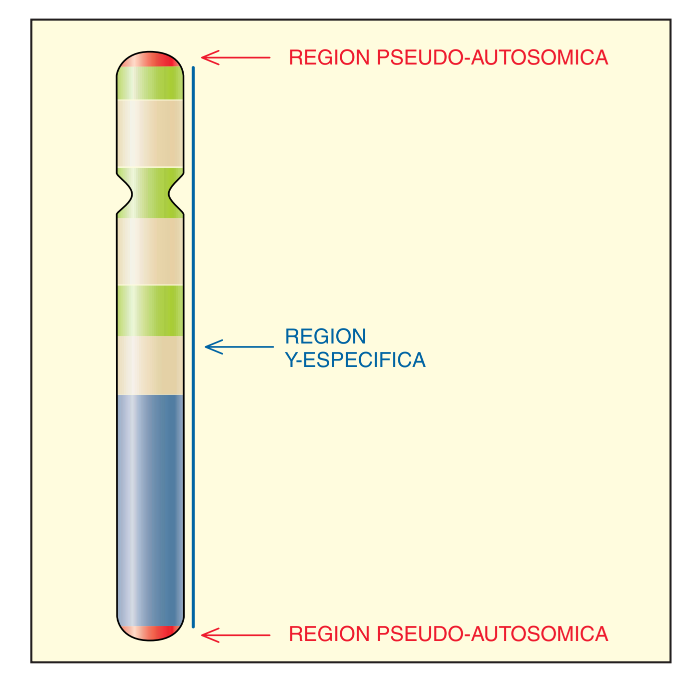
Ello no obstante, están emergiendo retazos de solución, parciales e incompletos, a partir de enfoques metodológicos distintos y complementarios: paleoantropología, arqueología lingüística y, más recientemente, genética molecular. A esta última nos ceñiremos.

Reconstrucciones evolutivas

La genética molecular puede utilizar dos enfoques para facilitar la comprensión de la historia evolutiva del hombre y, en particular, su instalación en ambos hemisferios americanos. De entrada podemos estudiar poblaciones actuales y realizar inferencias históricas, según veremos. Podemos también extraer ADN humano de momias y restos óseos arqueológicos para reconstruir la estructura genética de poblaciones del pasado.

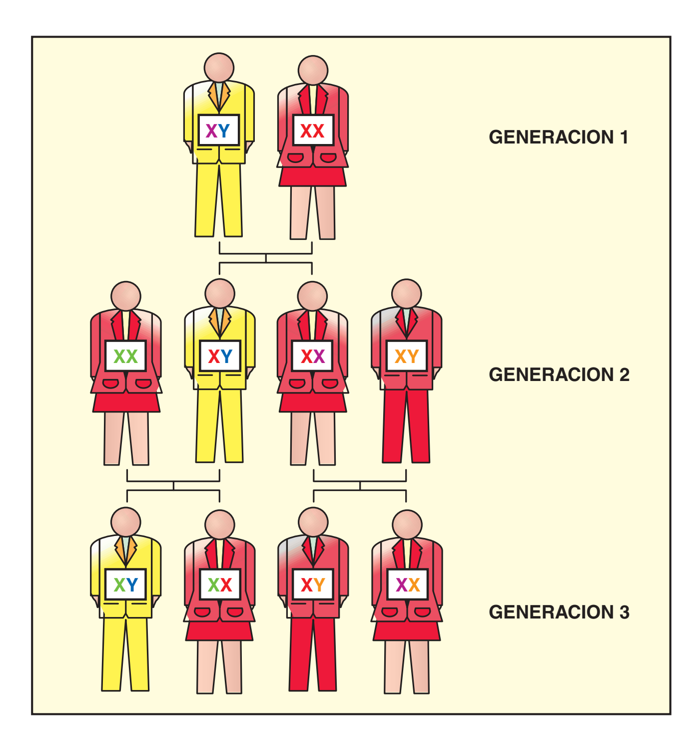
Pese a los indudables progresos registrados en la arqueología molecular, el estudio genético de poblaciones constituye el método científico más fiable. Para ello hemos de utilizar polimorfismos del ADN, es decir, regiones del genoma humano que difieren de un individuo a otro, siendo ambos normales.





2. IDEOGRAMA DEL CROMOSOMA Y HUMANO. Se indican en rojo las regiones pseudo-autosómicas, que presentan una estrecha homología secuencial entre las secuencias de los cromosomas X e Y. En el varón, estas regiones se aparean en la fase de meiosis y se produce un intercambio de material genético (recombinación). El fragmento Y-específico (indicado en azul) no sufre recombinación y se hereda en bloque (haplotipo) de padre a hijo.

Hay distintos tipos de polimorfismos, que divergen en razón de su naturaleza molecular y de su localización en el genoma humano. De acuerdo con el objetivo que nos propongamos, escogeremos uno u otro. Los polimorfismos localizados en los autosomas son marcadores excelentes de la individualidad, dada la diploidía y elevada tasa de recombinación que caracterizan a la especie humana. Por otro lado, los frecuentes intercambios génicos entre los cromosomas de cada par mezclan los genes y tornan efímeras las combinaciones.



3. MECANISMOS DE TRANSMISION HEREDITARIA de los cromosomas X e Y humanos. El cromosoma Y se transmite de padre a hijo, estableciéndose patrilinajes. En la figura, los individuos resaltados en amarillo pertenecen a un mismo patrilinaje.

Esa situación contrasta con la del cromosoma Y (segmento Y-específico) y del ADN mitocondrial, estructuras genómicas dotadas de propiedades singulares. En primer lugar, se heredan de un solo progenitor; el cromosoma Y se transmite de padre a hijos varones y el ADN mitocondrial pasa de madre a hijos e hijas. En segundo lugar, no intercambian genes con otros segmentos genómicos, es decir, no se recombinan. Por consiguiente, las combinaciones génicas en el cromosoma Y, y en el ADN mitocondrial, se transmiten en bloques génicos, llamados haplotipos.

Los haplotipos permanecen inalterados en patrilinajes (cromosoma Y) o matrilinajes (ADN mitocondrial) hasta que se produzca una mutación. Constituyen, por tanto, marcadores de linaje sumamente informativos para las reconstrucciones evolutivas.

Ventajas e inconvenientes

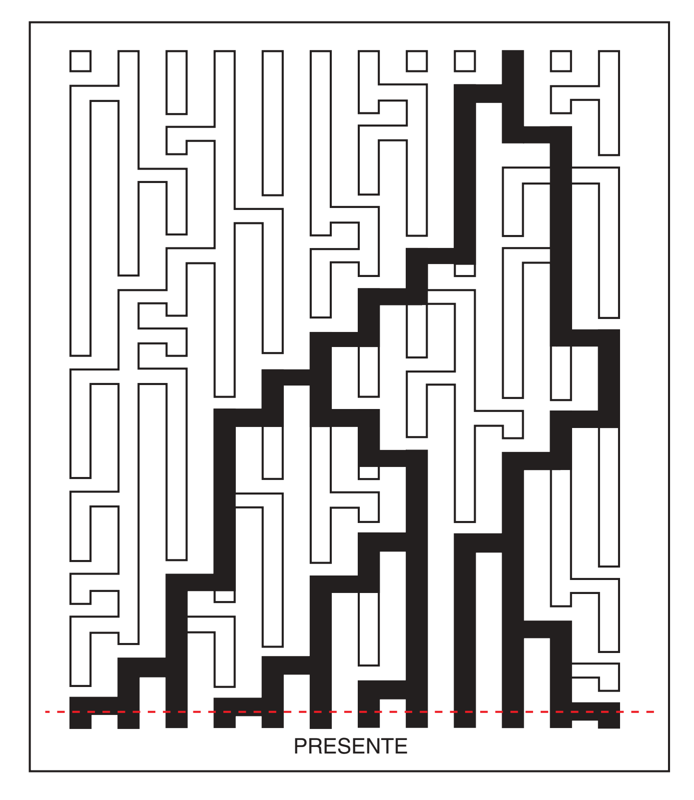
El cromosoma Y humano consta de tres partes. Presenta dos regiones pequeñas en las extremidades de los brazos cortos y largos, que poseen homología con el cromosoma X; porque pueden sufrir recombinación se les llama regiones pseudo-autosómicas. Un tercer fragmento, que constituye más del 90 % del cromosoma, es Y-específica y no sufre recombinación. Los haplotipos de esta región se transmiten inalterados de padre a hijo, hasta que ocurra una mutación.

Podemos, pues, trazar patrilinajes que alcanzan decenas de generaciones en el pasado. Se convierten así en eficaces herramientas para la reconstrucción evolutiva. Conviene, sin embargo, no perder de vista una limitación importante, a saber, que los haplotipos de Y, inalterados, representan una contribución genética de una parcela muy pequeña de todos los antepasados de un individuo.

Los dos tipos moleculares de polimorfismos de ADN más usados en los estudios de genética evolutiva son los polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, de “single nucleotide polymorphism”) y los polimorfismos de microsatélites. Los SNP son sitios de la secuencia de ADN en los que se dan dos bases alternativas con frecuencias superiores al 1 % de los cromosomas de una población. Se trata del tipo más común de variación del genoma humano.

Al ser muy pequeña su tasa de mutación, los SNP constituyen marcadores moleculares de evolución lenta; cada mutación viene a representar un solo episodio evolutivo. De ahí su enorme valor instrumental en la reconstrucción de la historia de las poblaciones humanas.

Por desgracia, los primeros estudios sistemáticos realizados del cromosoma Y mediante SNP demostraron una escasez significativa de variación genética en la secuencia de ADN. Las cosas cambiaron en 1994, cuando se describieron en el cromosoma Y polimorfismos de un solo nucleótido de fácil análisis. Más recientemente, gracias al trabajo del equipo de Peter Underhill, de la Universidad de Stanford, se identificó un número sig-



4. INFERENCIAS HISTORICAS realizadas a través del estudio de patrilinajes. Individuos dispares pertenecen hoy a un mismo patrilinaje (*en negro*) y descienden de un mismo antepasado que vivió hace varias generaciones.

nificativo de SNP en el cromosoma Y humano, que dio un poderoso impulso a los estudios evolutivos.

El segundo tipo de polimorfismo molecular son los microsatélites, secuencias genómicas formadas por repeticiones de motivos de 1-6 bases en múltiples copias hilvanadas (en tándem). La tasa de mutación de los microsatélites cuadruplica o quintuplica la de los SNP; en consecuencia, son multialélicos e hipervariables. La elevada tasa de mutación asociada a la naturaleza molecular de las mutaciones en los microsatélites explica que éstos constituyan marcadores de evolución rápida, se vean sometidos frecuentemente a mutaciones recurrentes o regresivas, o que borren información histórica sobre la evolución del marcador en las poblaciones. De forma general, pues, los SNP suministran información molecular sobre episodios evolutivos más antiguos, en tanto que los microsatélites nos remiten a acontecimientos recientes.

El haplotipo fundador

En 1992 el equipo encabezado por Jörg Epplen, de la Universidad de Munich, describió el primer microsatélite polimórfico del cromosoma Y humano. Se le denominó DYS19 y contenía repeticiones $(GATA)_n$. Interesados por este polimorfismo, nosotros demostramos la presencia de cinco alelos en la población brasileña con alta diversidad génica.

Por la misma época, Roewer y colaboradores informaron de los primeros estudios de DYS19 en Amerindios con una muestra de apenas 11 Yanomanos, de los cuales 10 presentaban el mismo alelo A (13 repeticiones GATA). Estos resultados se revelaron del mayor interés, toda vez que, en estudios de poblaciones de todo el mundo, nosotros observamos que en los europeos predomina el alelo B (14 repeticiones GATA), mientras que en africanos y asiáticos los alelos C y D son los más frecuentes.

De forma paralela, acometimos otros trabajos con un interesante y útil marcador polimórfico de ADN alfoide, localizado en la región centromérica del cromosoma Y, que había sido descubierto por Fabricio R. Santos, uno de los autores, durante una breve estancia con Chris Tyler-Smith en el departamento de bioquímica de la Universidad de Oxford. La base molecular de este polimorfismo es bastante compleja y sus pormenores traspasan los límites de este artículo. Baste con decir que la detección del polimorfismo se basa en la reacción en cadena de la polimerasa y que el polimorfismo es muy informativo. Hoy el número de tipos alfoides descritos excede el medio centenar.

Cuando establecimos haplotipos de cromosoma Y simultáneamente con el microsatélite DYS19 y con el sistema alfoide, observamos 46 haplotipos distintos en las poblaciones de varios continentes. Obtuvimos así una base molecular sólida para abordar estudios evolutivos humanos.

Comenzamos un trabajo de investigación conjunta con Néstor Bianchi, del argentino IMBICE, Francisco Carnese, de la Universidad de Buenos Aires, y Francisco Rothhammer, de la Universidad de Santiago. En ese estudio establecimos los haplotipos de 73 Amerindios de doce tribus, desde Argentina hasta México: Mapuche, Wichi, Chorote, Chulupi, Toba, Huilliche, Atacameño, Suruí, Caritiana, Quechua, Auca y Maya. Identificamos que un haplotipo, llamado IIA (combinación del tipo alfoide II con el alelo A de DYS19), se presentaba en el 74 % de la muestra. Si descartamos los Mapuches, que, como es sabido, recibieron un componente importante de flujo génico europeo, el porcentaje de haplotipo IIA aumentaba hasta el 91 %.

Fundados en ese trabajo, arribamos a la conclusión de que IIA era un haplotipo fundador principal de los Amerindios del sur. Para confirmar nuestra hipótesis, entablamos una colaboración con Francisco Salzano y Mara Hutz, de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Ricardo Santos y Carlos Coimbra, de la Fundación Oswaldo Cruz. Investigamos más de 37 Amerindios de cinco tribus del Amazonas y Brasil central: Waiwai, Gavião, Zoró, Suruí y Xavante. De nuevo, aparecía el haplotipo IIA en la mayoría de los individuos (87 %), lo que le confirmaba como haplotipo fundador principal de los Amerindios del sur.

Nos quedaba por estudiar los Amerindios de América del Norte para resolver si también en ellos predominaba el haplotipo IIA. Establecimos un plan de trabajo en colaboración con Kenneth Weiss, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y John Moore, de la Universidad de Florida, quienes nos enviaron muestras de ADN de amerindios Muskoke, residentes hoy en Oklahoma.

Se realizó el examen génico pertinente de 47 individuos. El haplotipo más frecuente fue IIA (38 % de los individuos de la muestra). Hemos de interpretar el resultado en el contexto de una perspectiva histórica. La tribu Muskoke tuvo su primer contacto con el hombre blanco en 1541, para mezclarse después ampliamente con poblaciones europeas y esclavos negros.

En consecuencia, la presencia del haplotipo IIA con una frecuencia de 0,38 constituye una prueba sólida de que, también para los Amerindios del Norte, se trata de

SERGIO D. J. PENA y FABRICIO R. SANTOS son docentes de la Universidad Federal de Minas Gerais. Catedrático de bioquímica, trabajo que comparte con su intervención en el proyecto HUGO para cartografiar el genoma humano, Pena pasó varios años enseñando genética humana en la Universidad McGill en Montreal. Santos se ha especializado en marcadores de ADN para el cromosoma Y y evolución molecular.

un haplotipo fundador del mayor interés. Considerados en su globalidad, nuestros datos respaldaban la tesis según la cual los Amerindios de las tres Américas provenían de una misma onda migratoria, de origen asiática, con predominio del haplotipo IIA.

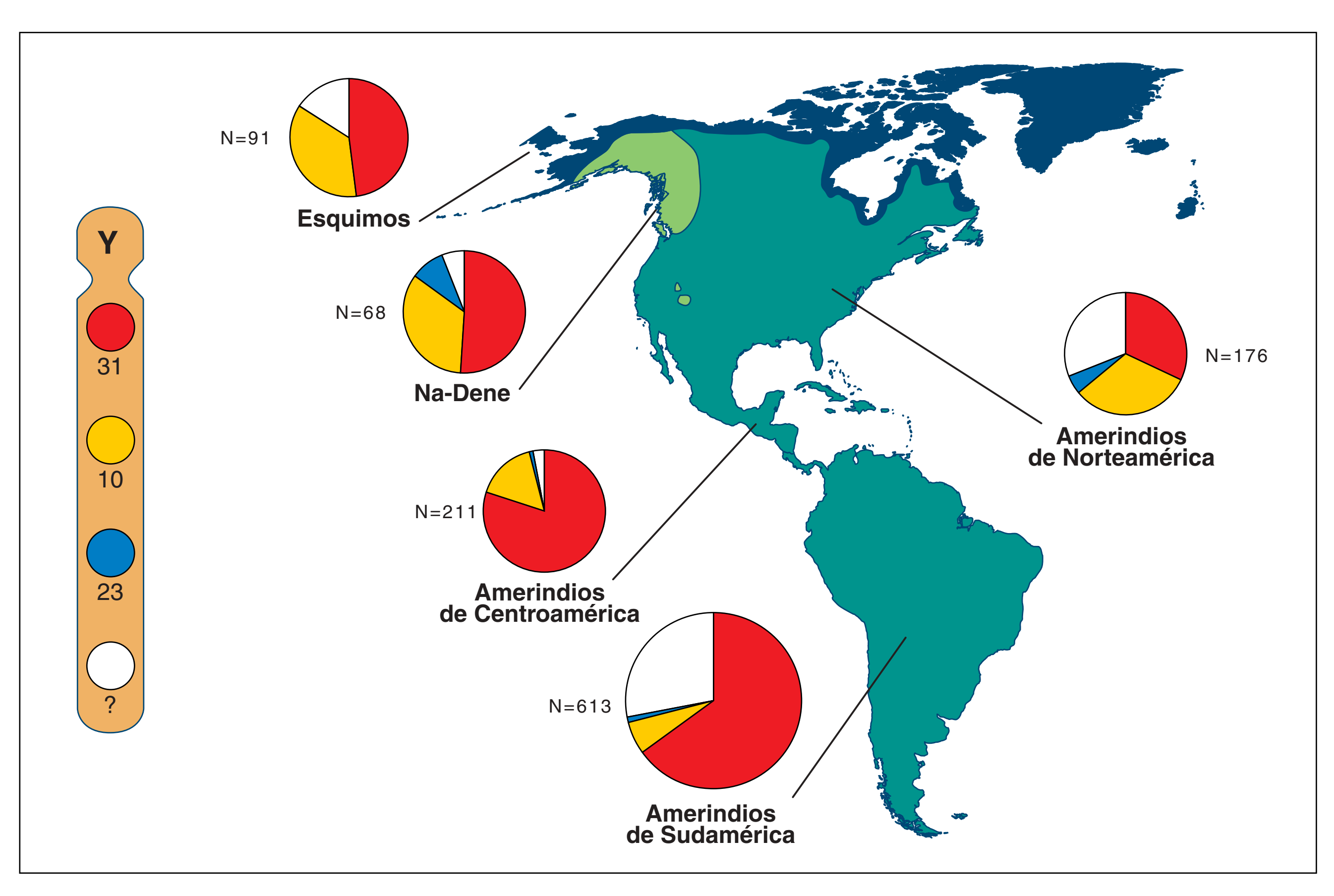
DYS199 T

A los pocos meses de publicar nuestros resultados sobre el haplotipo fundador de los Amerindios, abundaban en lo mismo Peter Underhill y Luca Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford. Emplearon éstos el DYS19 y un nuevo polimorfismo de secuencia, el DYS199. El polimorfismo en cuestión era un SNP, una posición en la cual los individuos presentan una base C o T.

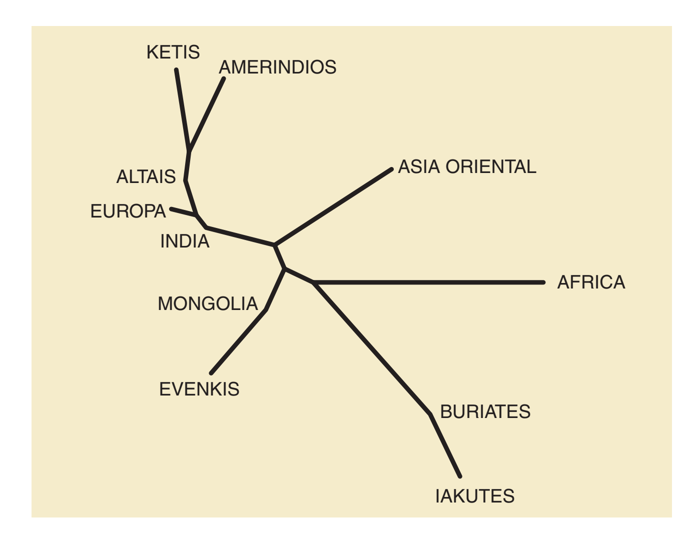
El alelo C de DYS199 se halló en todos los europeos, asiáticos, africanos y primates superiores estudiados (*n* = 123). Por su parte, en las poblaciones indígenas de América del Norte (en concreto una muestra de 54 individuos formada por 15 Caritianos, 17 Suruís, 8 Mayas, 2 Colombianos, 6 Esquimos y 6 Navajos), el alelo T apareció en el 91 % de los casos. Asimismo, en 36 individuos de haplotipo DYS199 T se realizó un tipaje de DYS19, del que resultó que una treintena portaba el alelo A (186 pares de bases). De ese modo se corroboraban nuestras conclusiones sobre la existencia de un importante haplotipo fundador en los Amerindios.

Más tarde, acometimos el tipaje de DYS199 en nuestras muestras de Amerindios. Confirmamos que todos los individuos IIA eran también DYS199 T. Pero no observamos el alelo DYS199 T en muestras de Mongolia ni de Siberia. De la ausencia de DYS199 en poblaciones no amerindias podíamos inferir que la mutación de C en T se produjo verosímilmente durante la migración de los asiáticos que poblaron América, o inmediatamente después.

Underhill descubrió la presencia del haplotipo DYS19 A-DYS199 T en 4/6 Esquimos y 2/6 Navajos. De acuerdo con lo indicado antes, Esquimos y Navajos pertenecen a grupos lingüísticos diferentes de los Amerindios. Para una de las hipótesis más aceptadas, los tres grupos lingüísticos provendrían de tres oleadas migratorias distintas.



5. DISTRIBUCION DE LOS PRINCIPALES CROMOSOMAS Y (haplotipos) entre nativos americanos. En el mapa se ilustra la distribución de los principales grupos de nativos americanos: Amerindios (*verde obscuro*), Na-Dene (*verde claro*), Esquimos (*azul marino*). Para cada grupo de poblaciones se indican los principales tipos de cromosomas Y (haplotipos 31, 10 y 23). El haplotipo 31 es el haplotipo fundador más importante. El haplotipo 10 es un haplotipo fundador secundario, antepasado del haplotipo 31, del que difiere por presentar la base C en el *locus* DYS199. El haplotipo 23 diverge de los haplotipos 10 y 31; posee una mutación en el *locus* RPS4Y. Algunos individuos (*haplotipos en color blanco*) representan cromosomas que no se han caracterizado todavía o que proceden del flujo génico de otros grupos étnicos (europeos, africanos, etc.).



6 ARBOL DE POBLACIONES DE CROMOSOMAS Y. Los árboles de poblaciones humanas se construyen atendiendo a las distancias genéticas entre haplotipos de cromosomas Y. Destaca la agregación de Amerindios, Ketis, Altais y Europeos en una rama del árbol.

Los resultados posteriores de otros investigadores confirmaron la presencia del alelo T en Na-Denes y Esquimos norteamericanos. Pero se ignora si la presencia de estos haplotipos se debe a su mezcla con Amerindios o si llegaron los tres grupos lingüísticos en una misma oleada migratoria.

Un hallazgo desconcertante fue el de la presencia del alelo T en bajas frecuencias en poblaciones siberianas (Esquimos siberianos, Chukchis y Evens). Pudiera ello quizás atribuirse a migraciones inversas, de América a Asia. Son flujos que hoy vemos en los Esquimos americanos con sus chalupas de cuero.

Origen de las migraciones

Nuestros propios resultados y los ofrecidos luego por otros estudiosos demuestran que la mayoría de los varones amerindios, aproximadamente el 90 % en América del Sur y en torno al 50-70 % en América del Norte, compartían un mismo haplotipo principal de cromosoma Y. ¿Podríamos, pues, servirnos de este haplotipo del cromosoma Y para identificar la población asiática que dio origen a la mayoría de los Amerindios?

Abordamos la cuestión a través del estudio genético de 306 varones de diversas poblaciones de todo el mundo, si bien pusimos especial énfasis en las siberianas y mongoles. Investigamos cinco grupos lingüísticos diferentes entre los siberianos: Buriates, Iakutes, Evenkis, Altais y Ketis. Empleamos siete sistemas polimórficos e identificamos 30 *loci* polimórficos en el cromosoma Y humano.

Nuestros resultados pusieron de relieve que las poblaciones asiáticas que entrañaban mayor parentesco genético con los Amerindios eran dos grupos siberianos, los Ketis (de la cuenca del río Yenissey) y los Altais (de los montes Altai). Los tres grupos siberianos restantes evidenciaban una mayor distancia genética respecto a los Amerindios y se agrupaban con los mongoles. Tales resultados recibieron ulterior confirmación en el trabajo realizado por el equipo de Michael Hammer, de la Universidad de Arizona.

Cierto haplotipo de cromosoma Y observado entre los Altais y los Ketis guardaba cercano parentesco con el principal cromosoma Y amerindio. Son raros los haplotipos similares a éste en la mayor parte de Asia (China, Japón, Indonesia), pero abundan en toda Europa. De ello



7. MAPA DE SIBERIA. Las poblaciones siberianas con los cromosomas más parecidos a los haplotipos 10 y 31 del continente americano se localizan en la meseta central de Siberia, en la cuenca del río Yenissey (Ketis) y los montes Altai (Altais). Esta región aparece definida por el rectángulo amarillo.

se deducía que hubo un tipo de cromosoma Y ancestral hace más de 30.000 años en Eurasia, que dio origen a la mayoría de cromosomas Y europeos, a los cromosomas Y de Ketis y Altais de Siberia y a los cromosomas Y de nativos americanos. Nos hallaríamos así ante una ruta migratoria hacia América que llegó por el norte asiático a través de Siberia y Beringia.

De nuestra investigación se desprende, pues, la existencia de un haplotipo fundador principal de los Amerindios de ambos hemisferios. Este haplotipo 31, así hemos dado en llamarle, se define por la presencia del alelo T en el locus DYS199; se encuentra casi exclusivamente en las Américas (aproximadamente el 90 % de los Amerindios del sur y el 50-70 % de los del norte) y parece haberse originado, durante una migración de Asia hacia América, a partir del haplotipo 10, el segundo más común en poblaciones amerindias.

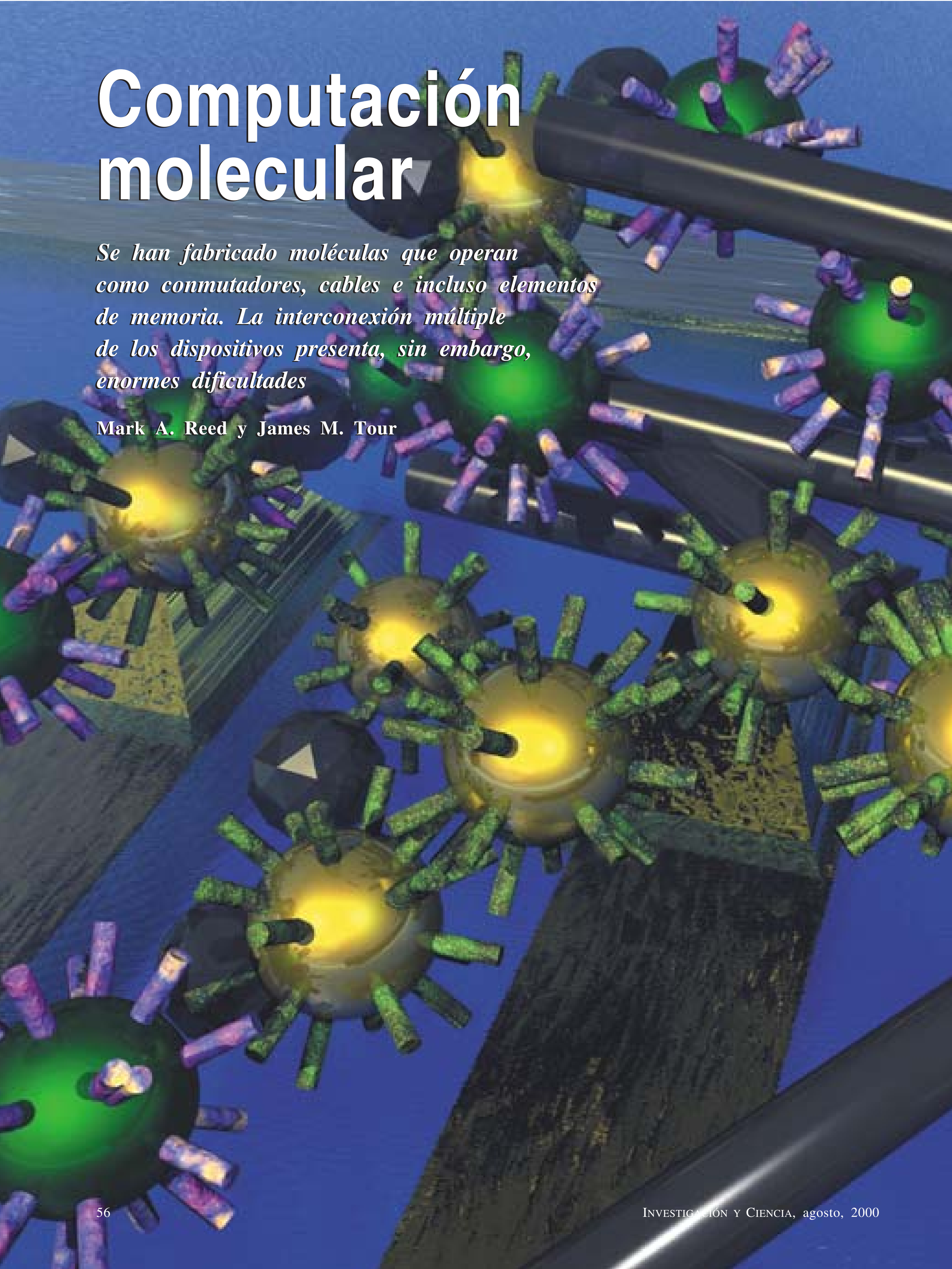
El haplotipo 31 y el haplotipo 10 se hallan genéticamente cerca de haplotipos observados en las actuales poblaciones de los montes de Altai. Allí se encuentran poblaciones con los cromosomas Y más próximos a los Amerindios. Esta es la historia que nos relata el cromosoma Y. Las versiones contadas por otros marcadores moleculares (como el ADN mitocondrial) y por los hallazgos arqueológicos difieren algo. Habrá que esperar ulteriores investigaciones, pero el camino está señalado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A MAJOR FOUNDER Y-CHROMOSOME HAPLOTYPE IN AMERINDIANS. S. D. Pena, F. R. Santos, N. O. Bianchi, C. M. Bravi, F. R. Carnese, F. Rothhammer, T. Gerelsaikhan *et al* en *Nature Genetics*, n.º 11, págs. 15-6, 1995.

A PRE-COLUMBIAN Y CHROMOSOME-SPECIFIC TRANSITION AND ITS IMPLICATIONS FOR HUMAN EVOLUTIONARY HISTORY. P. A. Underhill, L. Jin, R. Zemans, P. J. Oefner, L. L. Cavalli-Sforza en *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A*, n.º 93, págs. 196-200, 1996.

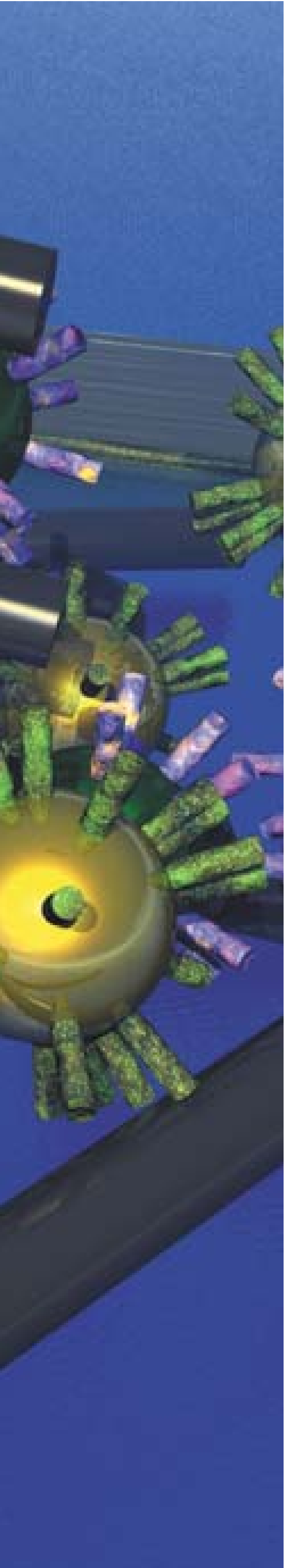
THE CENTRAL SIBERIAN ORIGIN FOR NATIVE AMERICAN Y CHROMOSOMES, F. R. Santos, A. Pandya, C. Tyler-Smith, S. D. Pena, M. Schanfield, W. R. Leonard, L. Osipova *et al* en *American Journal of Human Genetics*, n.º 64, págs. 619-28, 1999.



Computación molecular

Se han fabricado moléculas que operan como conmutadores, cables e incluso elementos de memoria. La interconexión múltiple de los dispositivos presenta, sin embargo, enormes dificultades

Mark A. Reed y James M. Tour



¿Dónde está el límite de la rapidez y potencia alcanzables por los ordenadores? ¿Se crearán "cerebros" artificiales que tengan una capacidad intelectual comparable —o incluso superior— con la del hombre? Las respuestas dependen en buena medida de la posibilidad de fabricar circuitos de ordenadores pequeños y densos en grado necesario.

Pocos investigadores, si es que existe alguno, creen que la técnica actual —microelectrónica de estado sólido basada en semiconductores— conducirá a circuitos suficientemente densos y complejos que den lugar a facultades cognitivas genuinas. Además, hasta hace poco ninguna de las técnicas propuestas para suplantar a la microelectrónica de estado sólido gozaba de atractivo sobresaliente. Pero en el curso del último año se han logrado avances revolucionarios que pueden cambiar de raíz el futuro de la computación. Aunque el trecho que media de ello a las máquinas inteligentes es largo y sembrado quizá de obstáculos insuperables, su mera existencia constituye todo un éxito.

Los avances se han logrado en electrónica molecular. Se trata de la posibilidad de construir moléculas que realicen por sí mismas funciones idénticas o similares a las de transistores, diodos, conductores y otros elementos claves de los microcircuitos conocidos. Tras un período de grandes esperanzas y escasos resultados tangibles, varios desarrollos recientes han alimentado la confianza en que algún día esta técnica proporcione las bases de construcción para futuras generaciones de una lógica electrónica ultrapequeña y ultradensa para ordenadores. En una notable serie de demostraciones, químicos, físicos e ingenieros han puesto de manifiesto que las moléculas pueden, por sí solas, conducir y conmutar la corriente eléctrica y almacenar información.

El año pasado, investigadores de Hewlett-Packard (HP) y de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA) anunciaron que habían construido un conmutador electrónico que consistía en una capa de varios millones de moléculas de rotaxano, una sustancia orgánica. Uniendo cierto número de conmutadores, fabricaron una versión rudimentaria de una puerta AND, dispositivo que realiza una operación lógica básica. Los conmutadores, con más de un millón de moléculas cada uno, son mucho mayores de lo que sería deseable. Además, sólo podían conmutar una vez antes de quedar fuera de servicio. Pese a ello, su ensamblaje en forma de puerta lógica fue un hito.

Pocos meses después de ese anuncio, nuestros grupos de las universidades de Yale y Rice publicaron los resultados de una clase diferente de moléculas que operaba como un conmutador reversible. Y a los treinta días de este informe describíamos una molécula, sintetizada por nosotros, que podía cambiar su conductividad eléctrica almacenando electrones a voluntad y actuaba como un dispositivo de memoria.

Para fabricar nuestro conmutador, insertamos zonas en las moléculas que atrapaban electrones, pero sólo cuando éstas se sometían a determinados voltajes. Así, el grado con el que las moléculas resistían a un flujo de electrones dependía del voltaje aplicado. Bastaba modificar el voltaje, para cambiar una y otra vez las moléculas de un estado conductor a otro no conductor, que es el requisito básico de un conmutador eléctrico. Nuestro minúsculo dispositivo constaba en realidad de una capa de unas 1000 moléculas de bencenotiol de nitroamina emparedada entre contactos metálicos.

Después de crear el conmutador, vimos que, si podíamos volver a diseñar la molécula de suerte que retuviese los electrones en vez de atraparlos durante un breve instante, nos hallaríamos con algo capaz de funcionar como un elemento de memoria. Nos pusimos a trabajar en la zona de atrapamiento de la molécula; la modificamos de manera que se pudiese cambiar repetidamente su conductividad. El "absorbente de electrones" resultante podía retener electrones durante casi 10 minutos, frente a los contados milisegundos de las clásicas memorias dinámicas de acceso aleatorio basadas en silicio.

Aunque esos primeros pasos resultaban muy alentadores, el camino que hay por delante es complejísimo. Con la creación de dispositivos individuales se ha subido un primer peldaño decisivo. Pero antes de que podamos construir un circuito completo para el mercado debemos encontrar la forma de fijar millones, miles de millones quizá, de dispositivos moleculares de diversos tipos sobre una superficie inmóvil y unirlos según el patrón que dicten nuestros esquemas de circuitos. La técnica es demasiado nueva para apostar con seguridad por la superación de tan imponente desafío.

1. CIRCUITO DE ELECTRONICA MOLECULAR, en la representación artística imaginada por uno de los autores (Reed). Los dispositivos moleculares son los elementos cilíndricos que brotan de las esferas. Se trata de partículas semiconductoras que actúan como elementos de memoria (*verde*) o partículas de oro que actúan como conectores eléctricos. Los bloques rectangulares negros mayores son conectores fabricados litográficamente para circuitos externos mayores de naturaleza común.

AcS $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$ $C_{12}H_{25}$

14 nanómetros

2. MOLECULA LARGA, "cable" potencial para conectar dispositivos moleculares. Uno de los autores (Tour) fabricó la molécula aplicando una nueva técnica de síntesis. Se ignora cómo insertar una molécula tan larga entre dos conectores eléctricos para comprobar su capacidad de transporte de corriente.

El final del camino

Si los retos que nos aguardan encierran tamaña dificultad, ¿por qué prestaron tanta atención los investigadores a estas etapas iniciales? La respuesta se esconde en nuestra sociedad industrial, en su absoluta dependencia de la microelectrónica, y en las limitaciones básicas de la técnica actual.

Esa técnica —de estado sólido y basada en el silicio— sigue la ley de Moore, axioma que afirma que el número de transistores que se pueden fabricar en un circuito integrado de silicio —y, por tanto, la velocidad de computación del mismo— se dobla en un período de 18 a 24 meses. Tras atenerse a esa trayectoria durante cuarenta años, la microelectrónica de estado sólido ha alcanzado una cota en la que los ingenieros pueden alojar en un trozo de silicio de pocos centímetros cuadrados unos 100 millones de transistores, con componentes clave que miden 0,18 micras.

Pero tales transistores son todavía mucho mayores que los dispositivos moleculares. Por dar una perspectiva de esa diferencia de tamaño: si el transistor común estuviese a una escala según la cual ocupase una página impresa de esta revista, un dispositivo molecular sería el punto situado al final de esta frase. Incluso dentro de una docena de años, cuando las previsiones de la industria sugieren que los transistores de silicio se habrán comprimido hasta los 120 nanómetros de longitud, seguirán abarcando una superficie 60.000 veces mayor que los dispositivos electrónicos moleculares.

Además, nadie espera que la microelectrónica del silicio continúe obedeciendo indefinidamente la ley de Moore. En algún punto los especialistas en la fabricación de pastillas semiconductoras (chips) encontrarán inviable, desde el punto de vista económico, reducir más la escala de la microelectrónica. Al condensar más transistores en un chip, las señales de fuga en éste, la necesidad de disipar el calor generado por dispositivos tan atestados y, sobre todo, la dificultad de crear los propios dispositivos terminarán por detener o frenar notablemente el progreso.

Los problemas —sin ser todavía fundamentales— que rodean la fabricación eficaz de transistores de talla menguante y sus interconexiones comienzan a tornarse cada vez más enojosos. Dificultades que podrían agudizarse cuando los transistores se aproximen a las 0,1 micras. Por culpa de esos y otros inconvenientes, el aumento exponencial en las densidades de transistores y las tasas de tratamiento de los circuitos integrados logran mantenerse sólo merced a un aumento exponencial similar en las inversiones necesarias para construir las plantas de chips. Pero la voluntad de reducir la escala terminará por chocar con los altísimos costes de infraestructura. El mercado alcanzará entonces el equilibrio. Se prevé que eso ocurrirá hacia el año 2015, si no antes, cuando una planta de fabricación cueste en torno a los 200.000 millones de dólares. En ese momento, el largo período de asombrosos avances en la potencia de tratamiento de los chips habrá llegado a su fin. Cualquier aumento ulterior en la potencia de los chips resultará prohibitivo en términos económicos.

Por desgracia, nos veremos en esa situación mucho antes de que los chips de los ordenadores adquieran potencia bastante para realizar uno de los sueños más acariciados por los informáticos: la creación de "cerebros" electrónicos refinados que permitan a los robots rendir a la par con los seres humanos en tareas cognitivas e intelectuales.

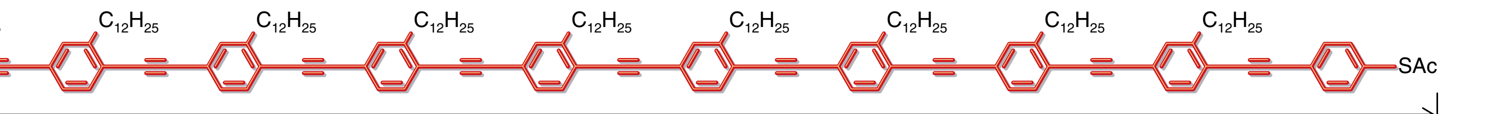
MARK A. REED y JAMES M. TOUR comenzaron su investigación conjunta sobre electrónica molecular en 1990. Reed dirige el departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Yale. Trabaja en nanotécnica y límites de la conducción electrónica. Autor de más de 100 publicaciones, posee 17 patentes sobre efecto cuántico, heterouniones y dispositivos moleculares. Tour es docente de química orgánica de la Universidad de Rice. Ha proyectado y sintetizado moléculas para electrónica.

Miles y miles de millones

El tamaño minúsculo de los dispositivos moleculares ofrece ventajas que trascienden la pura capacidad de condensar un mayor número de ellos en un área pequeña. Para aprovechar sus importantes ventajas hemos de entender su mecanismo de operación, lo que exige, a su vez, conocer el comportamiento de los electrones confinados en regiones de una extensión atómica o molecular.

Los electrones pueden asumir niveles de energía en un campo continuo de posibilidades. Pero en los átomos o moléculas, los electrones tienen niveles de energía cuantizados: sólo pueden adoptar uno entre cierto número de valores discretos, a la manera de peldaños en una escalera. Esta serie de valores discretos de energía es una consecuencia de la teoría cuántica y se cumple para cualquier sistema en el que los electrones se hallen confinados en un espacio infinitesimal. En las moléculas, los electrones se erigen en enlaces entre átomos, que se asemejan a "nubes" dispersas, denominadas orbitales. La forma del orbital viene determinada por el tipo y la geometría de los átomos que lo constituyen. Cada orbital es un nivel de energía, único y discreto, para los electrones.

Incluso los menores de los microtransistores de un circuito integrado al uso son demasiado grandes para cuantizar los electrones que hay en su interior. En estos dispositivos, el movimiento de los electrones está gobernado por características físicas —conocidas como estructuras de bandas— de los átomos de silicio componentes. Eso significa que los electrones se mueven en el material dentro de una banda de niveles permisibles de energía, que es bastante grande en relación con los niveles de energía admitidos en un átomo o molécula. Merced a ese abanico de niveles permisibles de energía, los electrones pueden ganar suficiente energía para pasar de un dispositivo al siguiente. Además, cuando estos dispositivos clásicos se aproximan a la escala de unos pocos centenares de nanómetros, se hace sumamente difícil evitar que las diminutas co-



rrientes eléctricas que representan información cursen de un dispositivo al adyacente. En efecto, los transistores dejan escapar electrones que representan información, lo que les impide permanecer en estado de "corte".

Construcción de abajo arriba

Amén de permitir que los dispositivos moleculares retengan con mayor firmeza sus electrones, los fenómenos mecanocuánticos cumplen otras funciones en moléculas especialmente diseñadas para ello. Por ejemplo, para construir un "cable" necesitamos una molécula alargada a través de la cual los electrones circulen de un extremo a otro. En cualquier estructura cuantizada, y una molécula lo es, los electrones tienden a moverse desde los niveles más altos de energía hacia los más bajos; para canalizar electrones necesitamos, pues, una molécula que tenga un orbital vacío de baja energía que esté disperso por toda la molécula, de un extremo a otro. En ese contexto, el orbital pi es un orbital electrónico vacío de baja energía típico. Llámase conjugada la configuración en la que las nubes electrónicas se solapan uniendo un componente molecular con el siguiente; en coherencia, nuestro cable molecular es un "sistema conjugado en pi".

Un dispositivo activo —un transistor—, sin embargo, no debe limitarse a dejar circular los electrones; ha de controlar dicha corriente. Al ingeniero de dispositivos moleculares le compete, pues, aprovechar los niveles discretos de energía del mundo cuántico e idear moléculas cuyas características orbitales alcancen el nivel deseado de control electrónico. Cuando en la molécula existe un solapamiento correcto de orbitales, se produce un flujo de electrones; pero si se perturba el solapamiento —porque la molécula ha rotado o se ha alterado su geometría— el flujo queda bloqueado. En otras palabras, la clave para el control molecular está en manipular el número de electrones que se permiten circular en un orbital de baja energía perturbando el solapamiento orbital en la molécula.

Los métodos de síntesis química facilitan ya el diseño y la producción de moléculas con átomos, geometrías y disposiciones orbitales específicas. Además, se crean cantidades enormes de estas moléculas al mismo tiempo, idénticas todas ellas y sin defectos. Semejante uniformidad resulta harto difícil y cara de lograr en otros procesos de fabricación por lotes, como los procesos basados en litografía utilizados para realizar los millones de transistores que hay en un circuito integrado.

Los métodos seguidos para producir dispositivos moleculares son los habituales de la industria farmacéutica. Elegido un compuesto, los químicos proceden a su gradual transformación añadiendo reactivos cuyas moléculas se sabe que se enlazan con otras en determinadas posiciones. El proceso consta de varias etapas; las piezas se juntan poco a poco y forman un nuevo dispositivo molecular potencial con la estructura orbital deseada. Una vez que se han fabricado las moléculas, nos servimos de técnicas analíticas (espectroscopía de infrarrojos, resonancia magnética nuclear y espectrometría de masas) para determinar o confirmar la estructura de las moléculas. Las técnicas aportan las diferentes piezas de información sobre la molécula, incluidos el peso molecular y el punto de unión o el ángulo de un determinado fragmento. Combinando la información, determinamos la estructura después de cada etapa, conforme se va sintetizando cada nueva molécula.

Uno de nuestros dispositivos activos más sencillos era una molécula basada en una cadena de tres anillos de benceno, en la que los orbitales se solapaban (se conjugaban) por toda la molécula. Procuramos que las uniones entre los anillos de benceno fueran de escasa solidez estructural; así, ligeras rotaciones o pliegues debilitaban o fortalecían la conjugación de los orbitales. Todo lo que necesitábamos era una forma de controlar estas rotaciones, y tendríamos un dispositivo molecular en el que podríamos controlar el flujo de corriente; en otras palabras, un conmutador.

Añadimos grupos NO_2 y NH_2 al anillo central de benceno de la molécula, que sobresalían hacia el exterior de la cadena en los lados opuestos del anillo central. Esta configuración asimétrica dejaba a la molécula con una nube electrónica asimétrica fuertemente perturbada. A su vez, la nube electrónica asimétrica perturbada tornaba, a la molécula, muy susceptible a la distorsión por un campo eléctrico: la acción de un campo eléctrico determinaba la rotación de la molécula. Contábamos, pues, con un dispositivo activo: cada vez que aplicábamos un voltaje a la molécula, se establecía un campo eléctrico que giraba la molécula y bloqueaba el flujo de corriente. Al retirar el voltaje, la molécula retornaba a su forma original, y la corriente circulaba de nuevo. En experimentos posteriores,

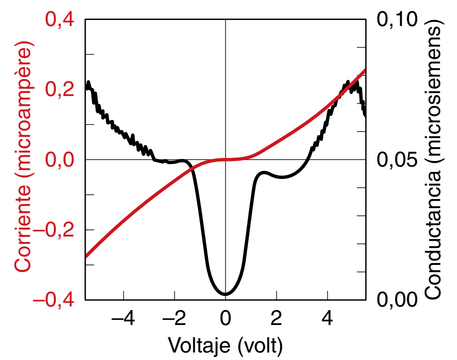
Lo básico

La tendencia inexorable a fabricar dispositivos cada vez menores quizá no deje otra opción que cambiar de raíz y mirar hacia una nueva forma de electrónica donde moléculas creadas a propósito sustituyan a los transistores de los circuitos actuales. Para algunos, ese cambio obligado podría darse antes de 10 años.

Un ordenador de uso general requiere un dispositivo de conmutación (un transistor), memoria y una forma de conectar arbitrariamente múltiples dispositivos y elementos de memoria. Se ha logrado ya fabricar conmutadores y elementos de memoria con moléculas sencillas. El conmutador obtenido consta, sin embargo, de sólo dos terminales. Mas, para construir circuitos lógicos complejos se necesita un dispositivo con más de dos terminales, en el que, por ejemplo, el flujo de corriente entre dos de ellos esté controlado por un tercero (modo de funcionamiento del transistor).

Carecemos, y eso es muy importante, de un método de conexión para el enorme número de dispositivos. Aunque no se han presentado todavía soluciones para el problema, se sospecha que se necesitarán arquitecturas y supuestos de nuevo cuño para sacarle pleno rendimiento a los dispositivos moleculares.

3. MOLECULA DE BENCENODITIOL, en su función de conductor molecular, probada entre puntas de oro en la geometría aquí ilustrada. Las características de corriente-voltaje de la molécula (*gráfica inferior*) guardan una estrecha correspondencia con la predicción teórica. La cuantía del flujo de corriente constituye un buen presagio sobre la capacidad de los dispositivos moleculares para funcionar con dispositivos electrónicos habituales.



hallamos que, para nuestro dispositivo infinitesimal, la brusquedad de la conmutación de un estado a otro superaba la de cualquier dispositivo equiparable de estado sólido.

Se requirió disponer de técnica refinada y dedicar años de investigación antes de que pudiésemos siquiera probar uno de estos dispositivos. El desafío básico estriba en alcanzar un dominio insondablemente liliputiense para entrar en contacto y habérnoslas con una molécula simple, de suerte que pudiéramos extraer información sobre el comportamiento de la misma.

La tarea era casi imposible antes de la invención, en los años ochenta, del microscopio de barrido de efecto túnel (STM) en los laboratorios de investigación de IBM en Zurich. El STM nos introduce en el mundo atómico; nos permite "ver" y manipular átomos y moléculas. Con una punta de metal afilada atómicamente y mantenida con suma precisión sobre una superficie, se explora la topografía de ésta por la diminuta corriente de electrones de efecto túnel, que circula entre la superficie y la punta. Explorando con la punta hacia adelante y hacia atrás se crea una imagen de las elevaciones y depresiones de la superficie.

Aunque la microscopía de barrido de efecto túnel es crucial para la comprobación y construcción de dispositivos individuales, cualquier circuito molecular útil constará de un gran número de dispositivos, ordenados y anclados fijamente en una estructura sólida para evitar que interaccionen al azar unos con otros. Se ha avanzado en la solución de reto tan formidable merced a los estudios de autoensamblaje, un fenómeno éste en el que los átomos, moléculas o grupos de moléculas se autodisponen de forma espontánea en diagramas regulares e incluso en sistemas complejos sin intervención externa.

Pegamento molecular

Una vez iniciado el proceso de ensamblaje, prosigue por sí mismo hasta un objetivo deseado [*véase* "Materiales autoensamblantes", por George M. Whitesides; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 1995]. En nuestra investigación recurrimos al autoensamblaje para unir números ingentes de moléculas a una superficie, normalmente metálica. Cuando se fijan las moléculas, que acostumbran presentar forma alargada, sobresalen de la superficie, a la manera de un bosque con árboles idénticos espaciados en una estructura reticular perfecta.

Se han estudiado varios sistemas de autoensamblaje. Nuestro trabajo nos exige a menudo unir dispositivos moleculares a una superficie metálica (oro casi siempre). Trabajamos con un fragmento molecular que unimos a uno o ambos extremos de nuestro dispositivo y que tiene una alta afinidad por los átomos de oro. El fragmento específico por nosotros usado, el extremo "pegajoso", está basado en un átomo de azufre; es decir, lo que los químicos llaman tiol.

Para iniciar el autoensamblaje, sólo necesitamos sumergir una superficie de oro en un vaso de precipitado. En este recipiente están disueltos nuestros dispositivos moleculares, cada uno con grupos terminales tiol en ambos extremos. De manera espontánea y en cifra elevada, los dispositivos se fijan por sí mismos a la superficie de oro.

Aunque es cómodo, el autoensamblaje solo no basta para producir sis-

temas útiles de computación molecular. No en un comienzo, al menos. Durante algún tiempo tendremos que combinar el autoensamblaje con métodos tomados prestados de la fabricación de semiconductores clásicos; por ejemplo, la fotolitografía. En esta técnica tradicional, se proyecta luz u otra forma de radiación electromagnética a través de una máscara en forma de plantilla para crear patrones de metal y semiconductor sobre la superficie de una oblea semiconductora. Nosotros nos servimos de la fotolitografía para generar capas de interconexiones metálicas y también agujeros en el material aislante depositado. En los agujeros creamos los contactos eléctricos y lugares seleccionados donde las moléculas están obligadas a autoensamblarse. Así, el sistema final consta de regiones de moléculas autoensambladas unidas por una red de interconexiones metálicas, a la manera de un laberinto.

La primera demostración con éxito de autoensamblaje en electrónica molecular se produjo en 1996, cuando el grupo de Paul S. Weiss, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ensayó con moléculas autoensambladas. Uno de los autores (Tour), entonces en la Universidad de Carolina del Sur, sintetizó los dispositivos. El grupo de Weiss halló que, mezclando una pequeña cantidad de una disolución de moléculas diseñadas para lucir propiedades conductoras con otra que contenía una molécula aislante inerte conocida, se obtenía una capa autoensamblada en la que las moléculas conductoras apenas aparecían entremezcladas entre las no conductoras. Colocando la punta de un STM sobre una de las moléculas conductoras aisladas, podían medir cualitativamente la conductividad. De acuerdo con lo esperado, ésta era notablemente mayor que la de las moléculas circundantes. A resultados similares llegaron un grupo de la Universidad de Purdue, que marcaron la parte superior de las moléculas conductoras con diminutas partículas de oro.

Al mismo tiempo en Yale, otro de los autores (Reed) realizó las primeras mediciones eléctricas cuantitativas de una sola molécula, que también se fabricó por autoensamblaje. El grupo de Reed midió la cantidad de corriente que podía circular a través de una molécula. El núcleo del montaje experimental residía en un STM modificado que permitía la colocación de dos puntas en oposición, con suficiente precisión y estabilidad mecánicas para que confinaran una molécula entre ellas. Se utilizó una molécula muy sencilla para transportar los electrones móviles: un anillo de benceno con grupos "pegajosos" de tiol en ambos extremos para establecer contacto con los conductores metálicos de las puntas del STM. Se obtuvo que la resistencia de la molécula era del orden de decenas de millones de ohms.

Los investigadores de Yale también descubrieron que la molécula podía mantener una corriente de unos 0,2 microampère a cinco volt, lo que significaba que la molécula podía canalizar a través de sí misma en torno a un billón (10^{12}) de electrones por segundo. Semejante guarismo, de suyo impresionante, llama mucho más la atención si caemos en la cuenta de que los electrones pueden pasar a través de la molécula en fila única (uno cada vez). La magnitud de la corriente era muy superior a lo que cabía esperar de simples cálculos de la potencia disipada en una molécula. Se llegó a la conclusión de que los electrones se desplazaban a través de la molécula sin generar calor por interacciones o colisiones.

A esas observaciones iniciales relativas a la conducción en las moléculas les siguieron demostraciones de dispositivos básicos. El dispositivo electrónico más sencillo es un diodo, una suerte de válvula de vía única para electrones. En 1997, al año de las primeras medidas de conducción en moléculas, dos grupos independientes construyeron diodos. En la Universidad de Alabama, Robert M. Metzger y su equipo sintetizaron una molécula que tenía una alineación energética interna de orbitales, variable según la polaridad del voltaje aplicado. La alineación de orbitales semejaba peldaños de una escalera. Cuando el voltaje se aplicaba en una dirección, la alineación correspondía a una escalera de mano apoyada contra una pared. Con esta orientación, cuesta un esfuerzo considerable subir por la escalera. Al invertir la polaridad del voltaje, la alineación de orbitales recordaba los peldaños de una escalera de mano tumbada en el suelo, sobre los que se puede saltar sin esfuerzo.

El grupo de Chong-Wu Zhou, de Yale, siguió un camino ligeramente diferente. En este diodo molecular las diferencias en la alineación de los niveles de energía sucedían en el exterior de la molécula, donde hacía contacto con el metal. El planteamiento funcionó bien y ayudó a poner los cimientos de la ingeniería de dispositivos y circuitos moleculares más útiles e interesantes.

Conexión de arriba abajo

Cuando comenzaron a construir estos dispositivos, el grupo de Yale adoptó una estructura ideada antes por Kristin Ralls y Robert A. Buhrman, de la Universidad de Cornell. La estructura contenía un agujero infinitésimo, un nanoporo; se creaba en él una "región activa" por autoensamblaje de un número relativamente pequeño de dispositivos moleculares en una sola capa o monocapa. En un agujero de sólo 30 nanómetros de ancho, se permitió que se autoensamblasen un millar de dispositivos moleculares. Con la evaporación de un contacto metálico sobre la parte superior de la monocapa autoensamblada ("SAM") se daba por terminado el dispositivo.

Después de usar esta configuración para fabricar y comprobar diodos moleculares, el grupo de Yale avanzó hacia dispositivos más complejos, es decir, conmutadores. Un conmutador que se pueda controlar es un requisito mínimo para un ordenador de uso general. Interesa más un conmutador que no se limite a abrirse o cerrarse, sino que pueda amplificar una corriente, amplificación que se requiere para conectar los innumerables interruptores demandados, por ejemplo, en la construcción de circuitos lógicos complejos. El transistor de silicio cumple estos dos requisitos, lo que explica su éxito en la técnica del siglo veinte.

El equivalente molecular de un transistor que conmute y amplifique corriente está aún por descubrirse. Pero se han dado ya los primeros pasos en esa dirección con la construcción del conmutador de rotación descrito. Jia Chen, doctorando del grupo de Reed en Yale, observó impresionantes características de conmutación, como una relación cierre/apertura superior a 1000, medida por el flujo de corriente en los dos estados diferentes. En comparación, el dispositivo análogo en el mundo del estado sólido, llamado diodo resonante de efecto túnel, tiene una relación cierre/apertura de aproximadamente 100.

Un comportamiento similar se descubrió en los experimentos de UCLA/HP. En ellos, la conductividad de una capa molecular de rotaxanos, moléculas que se asemejan a

una barra con una haltera, se podía interrumpir previsiblemente cuando se aplicaba un alto voltaje a la unión que contenía las moléculas. Para este voltaje, las moléculas reaccionaban y cambiaban de configuración, alterando la alineación de los orbitales e interrumpiendo el flujo de corriente a través de la molécula. Combinando tales uniones, construyeron un dispositivo que realizaba una sencilla función lógica.

Donde los dispositivos moleculares han encontrado futuro esperanzador ha sido en su función de elementos de memoria. La memoria activa, semejante a un transistor, constituye el otro requisito principal para un ordenador de uso general. Volvamos a nuestro conmutador de rotación. Alterábamos la unidad interna, dotada de actividad eléctrica (el anillo central de benceno desplazado con grupos opuestos NO_2 y NH_2), mediante la retención del grupo nitroso NO_2, "absorbente de electrones". En virtud de ese cambio, los orbitales moleculares quedaban expuestos a su modificación: ya fuere esparciéndolos ya localizándolos, según el estado de carga del grupo interno. La ausencia o presencia de carga en el nodo interno modificaría la conducción de los electrones a través de la molécula. Almacenando carga en el grupo nitroso, bloqueábamos la conducción, lo que representa un "0" binario. Sin carga almacenada en el grupo, la conducción, alta, venía a representar un "1" binario. Y merece subrayarse que la célula de memoria molecular retenía (o "recordaba" si se prefiere) el bit almacenado durante casi diez minutos, un intervalo sorprendente en comparación con un elemento normal de memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM), que se queda con un bit durante escasos milisegundos. (Las DRAM de silicio deben reabastecerse frecuentemente por medio de un circuito externo para retener sus datos.) La construcción del elemento de memoria, que implicaba una modificación directa del conmutador de rotación, demostraba también la facilidad y flexibilidad con que se pueden volver a diseñar los dispositivos moleculares.

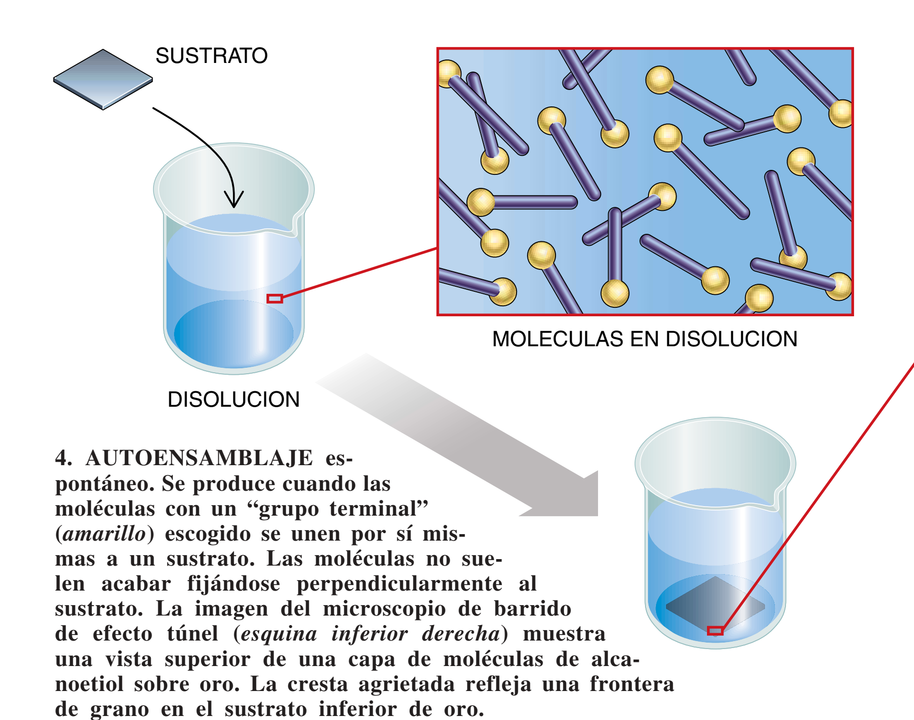
Dadas las enormes ventajas potenciales que éstos encierran, ¿por qué no abandonamos de una vez las investigaciones relacionadas con el silicio y nos empeñamos en los sistemas moleculares? Porque, no obstante los aspectos favorables descubiertos, persisten obstáculos formidables, algunos fundamentales, en el camino hacia los circuitos complejos y potentes.

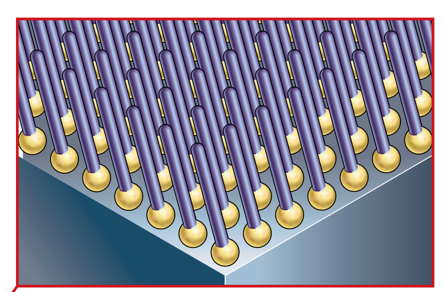
El transistor de mañana

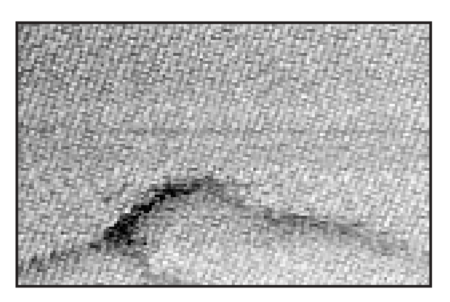
El desafío principal reside en la fabricación de un dispositivo molecular que funcione como un transistor. Tiene éste tres terminales; uno de ellos controla el flujo de corriente entre los otros dos. Aunque era eficaz, nuestro conmutador de rotación sólo poseía dos terminales; el flujo de corriente lo controlaba un campo eléctrico. En un transistor de efecto campo, el habitual en un circuito integrado, el control de la corriente se deja a cargo de un campo eléctrico, pero éste aparece cuando se aplica un voltaje al tercer terminal.

Un dispositivo molecular de tres terminales posibilitaría la síntesis química de circuitos sumamente eficaces y complejos. Antes de ese día, se usarán las combinaciones de sistemas moleculares y electrónica tradicional allí donde importen las ventajas del autoensamblaje. Pero la interfase entre los mundos microelectrónico y molecular presentará sus propias dificultades. Los chips de los ordenadores actuales tienen dos niveles de escala de tamaño. Partiendo de un chip macroscópico, que podemos ver y sostener en nuestra mano, se va reduciendo el tamaño en un factor de 1000 hasta arribar al cableado de las mayores conexiones del chip, menores que un cabello humano. Hay que operar otro factor de reducción de 1000 para llegar al nivel de las conexiones y componentes de los transistores. Si se han de añadir dispositivos moleculares a un chip, habrá que introducir otro factor de reducción de 1000 para la miniaturización de los componentes más pequeños de los dispositivos microelectrónicos.

Los problemas térmicos son también asombrosos, sobre todo si los ingenieros no encuentran en el empleo de dispositivos moleculares opciones alternativas a los modos y





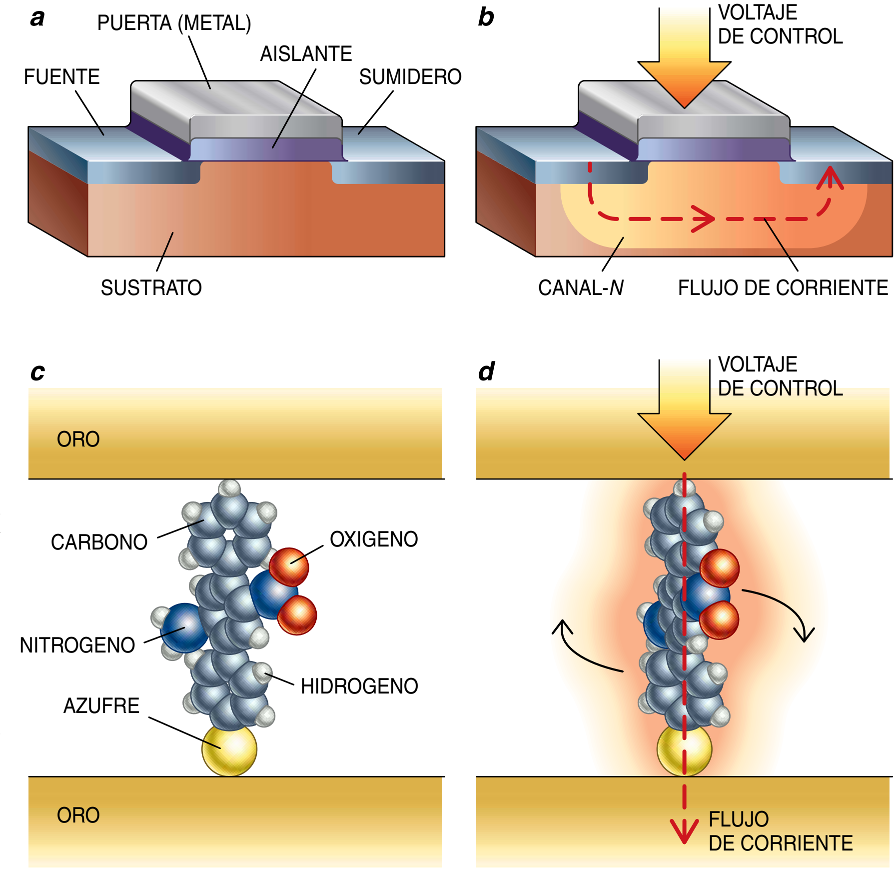


4. AUTOENSAMBLAJE espontáneo. Se produce cuando las moléculas con un "grupo terminal" (*amarillo*) escogido se unen por sí mismas a un sustrato. Las moléculas no suelen acabar fijándose perpendicularmente al sustrato. La imagen del microscopio de barrido de efecto túnel (*esquina inferior derecha*) muestra una vista superior de una capa de moléculas de alcanoetiol sobre oro. La cresta agrietada refleja una frontera de grano en el sustrato inferior de oro.

configuraciones de los transistores de los chips corrientes. El microprocesador de técnica más avanzada con diez millones de transistores y un ciclo de reloj de medio gigahertz (500.000 millones de ciclos por segundo) disipa casi 100 watt. Esta unidad se halla cerca del límite térmico de la técnica de semiconductores. Si se conociese la cantidad mínima de calor que emite un dispositivo molecular, podríamos limitar el número de dispositivos a introducir en un chip o sustrato.

Este límite fundamental de una molécula, que opere a temperatura ambiente y a las velocidades de hoy, es de unos 50 picowatt (50 billonésimas de watt). La cifra nos señala la existencia de un límite superior para el número de dispositivos moleculares que podemos empaquetar: unas 100.000 veces de lo que nos está ahora permitido con microtransistores de silicio en un chip. Aunque puede parecer un avance notable, queda muy por debajo de la densidad alcanzable si no tuviésemos que preocuparnos por la radiación térmica.

Para estos cálculos, damos por cierto que cada dispositivo es direccionable, convenio éste de uso en microelectrónica de silicio. Dicho de otra forma, se puede elegir cualquier dispositivo entre los incontables millones de ellos a través de las interconexiones. Este tipo de direccionamiento (que se llama acceso aleatorio) se necesitaría, por ejemplo, para recuperar el contenido de una ubicación específica de memoria.



5. MICROTRANSISTOR CLASICO (*a*) con tres terminales: fuente, puerta y sumidero. Un voltaje positivo aplicado a la puerta atrae electrones hacia el aislante (*b*), permitiendo que la corriente fluya de la fuente al sumidero. Para conmutar una corriente eléctrica se utilizó también una molécula de tres anillos de benceno (*c*). El anillo central tenía fragmentos asimétricos, lo que permitía su rotación por acción de un campo eléctrico (*d*). Cuando se aplicaba un determinado voltaje, el campo eléctrico giraba la molécula y posibilitaba el flujo de corriente.

Se ignora cómo crear tal estructura molecular de interconexión. No resulta práctica la traslación directa de las técnicas empleadas en microelectrónica compleja a la electrónica molecular, porque la litografía exigida para crear las interconexiones con moléculas simples trasciende la capacidad de las técnicas conocidas. ¿Es necesaria o eficaz para densidades de escala molecular la capacidad de direccionar cada dispositivo, método habitual de nuestros días? ¿Qué aspecto tendrán los circuitos a gran escala de esta técnica? ¿Podemos usar nanotubos, estructuras de carbón de pared simple con diámetros de uno o dos nanómetros y longitudes de menos de una micra, en la próxima generación de interconexiones entre dispositivos moleculares?

Dentro de unas décadas, quizá se imponga un cambio de rumbo drástico, en el que se abandone la ingeniería actual de ordenadores para sacarle el máximo partido a los sistemas informáticos, si seguimos empeñados en llevar la electrónica más allá de la ley de Moore. No sabemos muy bien cuáles podrían ser las nuevas vías a seguir. La capacidad para construir dispositivos moleculares, con nuevos paradigmas y normas sobre la conexión entre dispositivos, abrirán una senda inédita en la forma de abordar el diseño de ordenadores.

Pero tales nuevas técnicas están sembradas de problemas, que deben resolverse si se quiere que la electrónica continúe avanzando a un ritmo semejante al actual. Por espinosas que sean las dificultades, la recompensa que esconden será maravillosa. Forzando la ley de Moore más allá de los límites de la técnica potentísima en uso, los afortunados llevarán la electrónica hacia un vasto terreno inexplorado. Si nos fuera dado entrar en esa región, quién sabe si encontráramos, entre las sorpresas, la combinación de circuitos que dará lugar a nuestro sucesor intelectual.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CONDUCTANCE OF A MOLECULAR JUNCTION. M. A. Reed, C. Zhou, C. J. Muller, T. P. Burgin y J. M. Tour en *Science*, vol. 278, págs. 252-254; 10 de octubre, 1997.

A DEFECT-TOLERANT COMPUTER ARCHITECTURE: OPPORTUNITIES FOR NANOTECHNOLOGY. J. R. Heath, P. J. Kuekes, G. S. Snider y R. S. Williams en *Science*, vol. 280, págs. 1716-1721; 12 de junio, 1998.

MOLECULAR ELECTRONICS: SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dirigido por A. Aviram y M. Ratner en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 852; 1998.

LA PLAGA DE LAS

Con una exigua cantidad de ametralladoras y morteros, un centenar de insurgentes puede apoderarse de un país entero, matando y mutilando a cientos de miles de personas



1. ACHOY-MARTEN, 17 DE DICIEMBRE DE 1994: Un grupo de chechenos equipados con fusiles y otras armas portátiles, incluida una granada de la época de la segunda guerra mundial, un lanzagranadas y un bazuca, se ponen a cubierto pocas horas antes de que estalle la guerra.

Las noticias periodísticas que llegaban del genocidio de 1994 en Ruanda subrayaban el uso de armas tradicionales (porras, cuchillos y machetes) por las bandas asesinas de los extremistas hutus. Perecieron hasta un millón de tutsis y hutus moderados, muchos de ellos mujeres y niños. A ojos de los observadores externos, los ruandeses parecían sufrir un rapto de violencia frenética, siendo los aperos de labranza sus instrumentos de exterminio preferidos.

Pero eso no es todo. Antes de que empezase la matanza, el gobierno, dominado por los hutus, había repartido fusiles automáticos y granadas de mano entre las milicias oficiales y las bandas paramilitares. Esa fue la potencia de fuego que posibilitó el genocidio. Los milicianos aterrorizaban a sus víctimas con las armas y las granadas mientras las rodeaban para masacrarlas con machetes y cuchillos. Aunque el uso asesino de útiles agrícolas pudo parecer entonces una aberración medieval, las armas y las bandas paramilitares que facilitaron el genocidio eran muy contemporáneas.

Tal situación no fue caso único, ni mucho menos. Desde el final de la guerra fría, de los Balcanes a Timor oriental y en toda Africa, el mundo ha presenciado una erupción de conflictos étnicos, religiosos y sectarios caracterizados por la matanza rutinaria de civiles. Desde 1990 han estallado más de 100 conflictos, el doble que en decenios anteriores. Guerras que han costado la vida a más de cinco millones de personas, devastado regiones geográficas enteras y dejado decenas de millones de refugiados y huérfanos. En esa destrucción apenas intervinieron tanques, artillería o aviación, habitualmente asociados a la guerra moderna; en su mayoría la llevaron a cabo pistolas, ametralladoras y granadas de mano. Por muy beneficioso que el fin de la guerra fría haya sido en otros aspectos, ha desatado un diluvio mundial de armas sobrantes en un escenario donde el riesgo de conflictos locales parece haber crecido exponencialmente.

JEFFREY BOUTWELL y MICHAEL T. KLARE, codirectores del Proyecto sobre las Armas Ligeras de la Academia Estadounidense de Artes y Ciencias, han estado al frente de la edición de *Light Weapons and Civil Conflict*, que apareció en 1999. Boutwell es consejero delegado adjunto de la institución mencionada. Klare enseña en el Colegio Hampshire.

En la época de la guerra fría, la preocupación acerca de las armas nucleares y de los grandes sistemas de armas había dejado a los vinculados al control de armamentos con escaso conocimiento del comercio mundial de armas portátiles (pistolas, revólveres, fusiles y carabinas) y de armas de pequeño calibre, o ligeras (ametralladoras, pequeños morteros y otras armas fácilmente transportables por una o dos personas). Pero a lo largo de los últimos años muchos de nosotros hemos comenzado a examinar por qué esas armas resultan tan accesibles y de qué modo afectan a las sociedades que ahora inundan. Ante los preocupantes descubrimientos realizados, ha surgido un nuevo movimiento en pro del control de armamentos, conducido por una coalición oficiosa de la ONU, gobiernos afectados y organizaciones no gubernamentales.

Por varias razones las armas portátiles y las ligeras son las preferidas en la mayoría de los conflictos internos. De uso sencillo y transporte cómodo, se obtienen sin dificultad y a un precio bastante barato. A diferencia de las armas tradicionales de gran tamaño (piénsese en cazas o tanques), que son adquiridas casi exclusivamente por los ejércitos, las armas portátiles tienden la raya divisoria entre las fuerzas gubernamen-

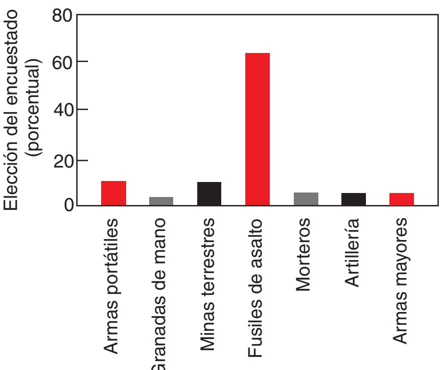
ARMAS PORTATILES

Jeffrey Boutwell y Michael T. Klare

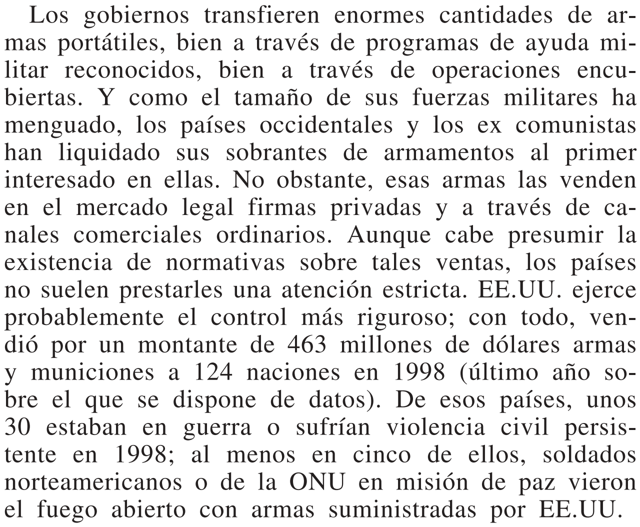


tales (policías y soldados) y las poblaciones civiles. Según las leyes sobre armas de cada país (suponiendo siquiera que existan o que se hagan cumplir), a los ciudadanos se les permite quizá poseer desde pistolas y rifles de caza hasta armas de asalto de tipo militar.

En contraste con el declive del comercio de armas pesadas desde el fin de la guerra fría, las ventas de armas portátiles y ligeras se mantienen boyantes. Ninguna organización proporciona datos detallados acerca del comercio mundial de esas armas, en parte a causa de la dificultad de seguir la pista a tamaño número de transacciones (y a causa de la escasa atención prestada al problema). Estimaciones fiables del comercio legal de armas portátiles y ligeras sitúan la cifra anual entre 7000 y 10.000 millones de dólares. Una cantidad apreciable, aunque desconocida, del comercio de armas portátiles (por un valor de 2000 a 3000 millones de dólares al año) la canaliza el mercado negro. Ante la escasez de datos, resulta difícil comparar esos números con los correspondientes a las exportaciones de armas portátiles durante la guerra fría. Sin embargo, estudios efectuados en Africa meridional y en el subcontinente indio revelan que durante la década de 1990 la disponibilidad de fusiles de asalto aumentó considerablemente.



2. LAS ARMAS MAS DESTRUCTORAS son los fusiles de asalto, según los miembros de la Cruz Roja a quienes se pidió que describieran cuáles causaban más bajas entre la población civil.



Los gobiernos transfieren enormes cantidades de armas portátiles, bien a través de programas de ayuda militar reconocidos, bien a través de operaciones encubiertas. Y como el tamaño de sus fuerzas militares ha menguado, los países occidentales y los ex comunistas han liquidado sus sobrantes de armamentos al primer interesado en ellas. No obstante, esas armas las venden en el mercado legal firmas privadas y a través de canales comerciales ordinarios. Aunque cabe presumir la existencia de normativas sobre tales ventas, los países no suelen prestarles una atención estricta. EE.UU. ejerce probablemente el control más riguroso; con todo, vendió por un montante de 463 millones de dólares armas y municiones a 124 naciones en 1998 (último año sobre el que se dispone de datos). De esos países, unos 30 estaban en guerra o sufrían violencia civil persistente en 1998; al menos en cinco de ellos, soldados norteamericanos o de la ONU en misión de paz vieron el fuego abierto con armas suministradas por EE.UU.

Tenemos pocos datos acerca de las cantidades o de los valores en dólares de las armas portátiles vendidas por otros fabricantes. Tomando como base los inventarios de armas de fuerzas militares y policiales de todo el mundo es posible, no obstante, identificar algunos de los principales suministradores: Rusia (fabricante del fusil de asalto AK-47, y su derivado el AK-74), China (fabricante de un sosias del AK-47 conocido como fusil Tipo 56), Bélgica (fusil de asalto FAL), Alemania (fusil G3). EE.UU. (Fusil M16) e Israel (metralleta Uzi).

Las armas portátiles comunes, tales como el AK-47, son baratas, fáciles de producir y resistentes. Fabricadas en grandes cantidades en más de 40 países, pueden comprarse a precios de ganga en muchas zonas del globo. En Angola, por ejemplo, un AK-47 usado cuesta quince dólares o un saco grande de maíz. El precio es un factor crucial: muchos de los beligerantes en esas luchas internas son pobres y a menudo están excluidos del mercado legal de armas. Como resultado, consideran que su único remedio está en las armas portátiles y ligeras, baratas, acaso compradas ilegalmente.

La proliferación de fusiles automáticos y metralletas ha dotado a los grupos paramilitares de una potencia de fuego que muchas veces iguala o excede a la de las fuerzas policiales o parapoliciales del país. Los fusiles de asalto modernos realizan centenares de disparos por minuto. Un único tirador puede matar a docenas o incluso centenares de personas en muy poco tiempo. Con la increíble potencia de fuego de esas armas, civiles no entrenados, incluso niños, se convierten en combatientes letales. A diferencia de las armas de épocas anteriores, cuyo uso eficaz solía requerir un sistema de pun-

ESTADO GENERAL

Oferta y demanda

Son muy pocos los países abastecedores de armas portátiles y ligeras. Indicamos algunos de los modelos más abundantes en el mercado. Por su poco peso y mortífera potencia de fuego resultan apropiados para su uso por soldados mal entrenados, incluidos los niños. El mapa reseña 50 países en conflicto; se incluye la información disponible acerca de los niños soldados y los principales suministradores de armas.

PRINCIPALES SUMINISTRADORES DE ARMAS

ALEMANIA (A)	**FRANCIA (F)**
BELGICA (BE)	**ISRAEL (IS)**
BRASIL (BR)	**ITALIA (IT)**
BULGARIA (BU)	**REINO UNIDO (R.U.)**
CHINA (C)	**RUSIA (R)**
ESTADOS UNIDOS (EE.UU.)	**SUDAFRICA (SA)**

M16 (y modelos similares)

Empleado en **67** países
Fabricante principal: **EE.UU.**
Fabricado también en otros cuatro países, Corea del Sur y Filipinas incluidos
Producción total: **8 millones**
Peso: **2,9 kg**
Calibre: **5,56 mm**
Cadencia de fuego: **700-950 disparos por minuto**

Fusil FAL (y modelos similares)

Empleado en **94** países
Fabricante principal: **Bélgica**
Fabricado también en otros once países, Argentina y Brasil incluidos
Producción total: **5-7 millones**
Peso: **4,3 kg**
Calibre: **7,62 mm**
Cadencia de fuego: **600-700 disparos por minuto**

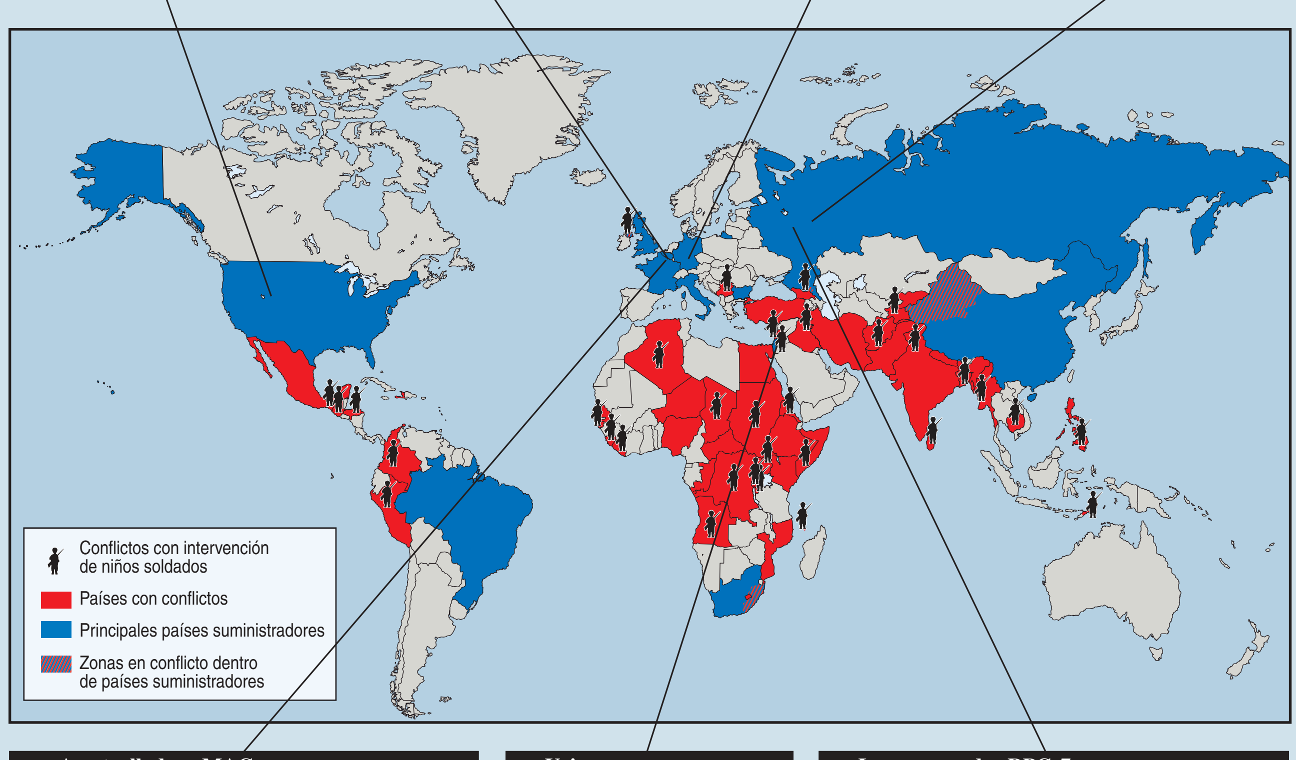
Fusil G3 (y modelos similares)

Empleado en **64** países
Fabricante principal: **Alemania**
Fabricado también en otros doce países, Reino Unido y Turquía incluidos
Producción total: **7 millones**
Peso: **4,4 kg**
Calibre: **7,62 mm**
Cadencia de fuego: **500-600 disparos por minuto**

AK-47 (y modelos similares)

Empleado en **78** países
Fabricante principal: **Rusia**
Fabricado también en otros once países, China y Egipto incluidos
Producción total: **35-50 millones**
Peso: **4,3 kg**
Calibre: **7,62 mm**
Cadencia de fuego: **600 disparos por minuto**





Ametralladora MAG (y modelos similares)

Empleada en **81** países
Fabricante principal: **Bélgica**
Fabricada también en otros siete países, EE.UU e India incluidos
Producción total: **150.000 (sólo en Bélgica)**
Peso: **11 kg**
Calibre: **7,62 mm**
Cadencia de fuego: **650-1000 disparos por minuto**

Uzi (y modelos similares)

Empleada en **42** países
Fabricante principal: **Israel**
Fabricada también en China y Croacia
Producción total: **desconocida**
Peso: **3,5 kg**
Calibre: **9 mm**
Cadencia de fuego:**600 disparos por minuto**

Lanzagranadas RPG-7 (y modelos similares)

Empleado en **40** países
Fabricante principal: **Rusia**
Fabricado también en otros seis países, China e Irán incluidos
Producción total: **desconocida**
Peso (con visor): **6,3 kg**
Calibre de la granada: **85 mm**

FUENTES: Jane's Infantry Weapons, 2000-2001; *y* Military Small Arms of the 20th Century (7.ª ed.); *los pesos se refieren al arma sin munición.*

ZONAS EN CONFLICTO

ZONAS EN CONFLICTO EN 1998, 1999 O 2000	SOLDADOS Y REBELDES MENORES DE 18 AÑOS		ABASTECEDORES DE ARMAS CONOCIDOS
	NUMERO TOTAL	EDAD MINIMA	
AFGANISTAN	100.000+*	10	R
ANGOLA	7000+	8	R, F, EE.UU., particulares
ARGELIA	100+*	15	R
BANGLADESH	100+	16	
BIRMANIA	50.000+	6	C, domésticos
BURUNDI	8000+	8	particulares
CACHEMIRA	100+*	12	C, R, R.U., F, A, EE.UU., domésticos
CAMBOYA	7000*	5	F, R, C, SA
CHAD	DESCONOCIDO	12	EE.UU., F
CHECHENIA	1000+*	11	
CHINA	NINGUNO		
COLOMBIA	19.000+	8	EE.UU., A, R
CONGO (Brazzaville)	DESCONOCIDO	14	IT, mercado negro
CONGO (Kinshasa)	6000+	7	C, F, EE.UU.
EGIPTO	NINGUNO		EE.UU., F
ERITREA	100+	11	
ETIOPIA	DESCONOCIDO	12	
GEORGIA	NINGUNO		
GUATEMALA	1000+*	11	
GUINEA-BISSAU	50+	17	
HAITI	NINGUNO		
HONDURAS	1000+*	13	
IRLANDA DEL NORTE	DESCONOCIDO	16	
ISLAS COMORES	DESCONOCIDO	13	
ISLAS FILIPINAS	1000+	10	EE.UU., R.U., domésticos
KENIA	NINGUNO		EE.UU., BE
KIRGUISIA	NINGUNO		
KOSOVO	100+*	13	
KURDISTAN (Irak, Iran, Turquía)	3000+	7	F, C, BR, EE.UU., A, R, IT, IS, R.U., dom.
LESOTHO	NINGUNO		
LIBANO	100+*	9	
LIBERIA	12.800*	6	
MEXICO	1000+*	6	
MOZAMBIQUE	NINGUNO		
NEPAL	NINGUNO		
NIGER	NINGUNO		
NIGERIA	NINGUNO		
PALESTINA (territorios ocupados)	1000+*	12	
PERU	2100+	9	R, EE.UU.
REP. CENTROAFRICANA	NINGUNO		
RUANDA	20.000+	7	C, IS, SA, EE.UU.
SENEGAL	NINGUNO		
SIERRA LEONA	5000+	5	EE.UU.
SOMALIA	1000+*	11	
SRI LANKA	1000+*	8	C, EE.UU., IS, mercado negro
SURAFRICA	NINGUNO		EE.UU., IS, F, R.U., A, dom.
SUDAN	25.000+	7	C, F
TAJKISTAN	100+*	16	R
TIMOR ORIENTAL	1000+	15	EE.UU., R.U., A, F, R, domést.
UGANDA	8000+	5	EE.UU., R

** Estimación de 1996 (las demás cifras son de 1998-2000)*

FUENTES: Amnistía Internacional, Coalición contra los niños soldados, Foro para la Investigación aplicada y política pública, Proyecto Ploughshares, Save The Children.

tería de precisión y vigor físico, las armas automáticas ultraligeras las pueden transportar y disparar niños.

Pese a que la cifra de 10.000 millones de dólares gastados al año en armas portátiles y ligeras parezca insignificante, comparada con los 850.000 millones de dólares del presupuesto militar mundial, el dinero de las armas ligeras ha tenido una repercusión enormemente desproporcionada sobre la seguridad global. Además de asolar tantos países, esas armas han hecho aumentar drásticamente las demandas a las agencias de ayuda humanitaria, a los cuerpos de paz de la ONU y a la comunidad internacional. Por citar sólo una estadística, las ayudas internacionales en socorro de zonas en conflicto se quintuplicaron durante los años noventa, hasta un máximo de 5000 millones anuales, al tiempo que disminuían las ayudas para el desarrollo a largo plazo. Los tratamientos más perdurables para la pobreza, las privaciones y la guerra se han sustituido por remedios a corto plazo. Por no mencionar que las milicias equipadas con escasos miles de fusiles de asalto han agotado los beneficios que habían conseguido miles de millones de dólares y años invertidos en el desarrollo de muchos países pobres.

Con 100 hombres a la Presidencia

En ningún lugar como en Africa Occidental se ha patentizado con mayor dramatismo la relación entre la accesibilidad a las armas ligeras y el estallido de un conflicto grave. La primera víctima fue Liberia. En la Nochebuena de 1989, Charles Taylor invadió el país con sólo 100 soldados irregulares armados con fusiles de asalto AK-47. Al cabo de meses, el jefe insurgente se había apoderado de recursos mineros y madereros cuyos beneficios empleaba en adquirir más armas ligeras. De haber necesitado equipar a sus fuerzas con armas pesadas (artillería, carros blindados y tanques), Taylor se habría enfrentado a obstáculos logísticos paralizantes. En comparación, unas pocas barcadas de fusiles de asalto, granadas cohete y ametralladoras fueron transportadas sin complicaciones y le proporcionaron una potencia de fuego más que suficiente. En 1990 los indisciplinados y mal entrenados rebeldes de Taylor derribaron al gobierno del presidente Samuel Doe (que había llegado al poder diez años antes, merced a un golpe de estado clásico, aunque sangriento). La lucha continuó siete años más.

La potencia de fuego de las armas portátiles modernas, y la rápida escalada de violencia que posibilitan, se evidenció en las primeras etapas de la guerra civil liberiana. En agosto de 1990, en represalia contra la participación de Ghana en una fuerza de paz en Africa Occidental (que intentó pero no logró detener la lucha), las tropas de Taylor exterminaron en una jornada a 1000 inmigrantes ghaneses. La masacre sucedió en el pueblo liberiano de Marshall. Asimismo, fuerzas leales a Doe pasaron por las armas a 600 gios y manos étnicos, grupos liberianos partidarios de Taylor, refugiados en una iglesia de Monrovia, la capital.

Siguió Sierra Leona. En 1991 Taylor y Foday Sankoh, un oficial descontento del ejército de Sierra Leona, iniciaron una alianza informal. No tardó en producirse un trasiego de armas y combatientes por la frontera que separaba ambos países. Hacia 1999 la guerra civil en Sierra Leona se había cobrado la vida de más de 50.000 personas, mientras que otras 100.000 habían sido deliberadamente lesionadas y mutiladas. Hasta el verano

de 1999 los esfuerzos combinados de las fuerzas pacificadoras de la ONU y Africa Occidental no lograron la gestión de un acuerdo de paz, acuerdo que incluía la recogida y destrucción de las armas de los antiguos combatientes.

Los actuales esfuerzos para la paz en Sierra Leona y Liberia siguen siendo tenues y muy dependientes de lo que suceda con las decenas de miles de armas que hay en esos países. Para octubre de 1999, en Liberia el programa de desarme había destruido unas 20.000 armas portátiles y ligeras y más de tres millones de cartuchos. Pero los funcionarios de la ONU destinados en la frontera con Sierra Leona se quejan de que los rebeldes se rinden a los pacificadores sin entregar sus armas, pese al incentivo de 300 dólares que se les ofrece a cambio. Esa incapacidad para desarmar a los ex combatientes ha desembocado en nuevos brotes de lucha.

Un ciclo de violencia casi igual sepultó a Ruanda, pero en una escala mucho peor. Lo mismo el gobierno de la mayoría hutu que la oposición de la minoría tutsi habían recibido un suministro abundante de armas portátiles y ligeras. Francia, Egipto y Sudáfrica equipaban al gobierno; Uganda y China al Frente Patriótico Ruandés (FPR). Mientras las fuerzas gubernamentales contenían al FPR con morteros y ametralladoras, los milicianos hutus dotados con armas portátiles y machetes exterminaron un millón de tutsis y hutus moderados entre mayo y junio de 1994. El genocidio no acabó hasta la extinción de la mayoría de los tutsis de Ruanda o su huida a zonas controladas por el FPR.

Similares actos de brutalidad se repiten en las luchas étnicas y partidistas. Una vez que los grupos enfrentados se hayan equipado con armas automáticas, basta cualquier futilidad para provocar un baño de sangre. Y la disponibilidad de tales armas, incluso en lugares tan remotos e inaccesibles como el Sudán meridional o el Congo oriental, impide que la comunidad internacional siente a las partes enfrentadas en la mesa de negociaciones o pueda contener la sangría cuando se firme el alto el fuego. La gestión de la paz se ha mostrado especialmente difícil en Angola y Sierra Leona, donde las fuerzas rebeldes podían cambiar diamantes y otras mercancías por armas y municiones en el mercado negro.

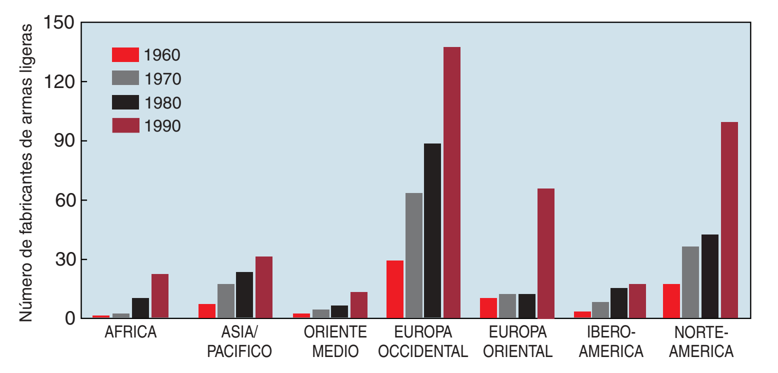
El corrosivo efecto de las armas

En todo el mundo las causas de los conflictos étnicos, religiosos y partidistas son complejas y plurales, que arrancan de agravios históricos, privaciones económicas, liderazgos demagógicos y falta de democracia. Aunque las armas portátiles y las ligeras no originen de suyo el conflicto, la fácil accesibilidad y bajo precio pueden prolongar la lucha, alentar las resoluciones violentas de las diferencias y generar mayor inseguridad social, lo que a su vez conduce a una demanda creciente de esas armas y de su empleo.

En 1998, en un informe general sobre el problema de la proliferación de armas portátiles, el Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR) señalaba su inquietud cada vez más intensa acerca del problema, en particular por lo que afectaba a la población civil. En su función de guardián de las leyes humanitarias internacionales, el CICR mostraba su especial preocupación por tres peligrosas tendencias. Primera, el número creciente de muertos y heridos civiles (que a menudo alcanza al 60 u 80 por ciento del total de bajas). Equipados con armas automáticas de fuego rápido, unos combatientes sin entrenamiento ni disciplina, que no han oído hablar de la Convención de Ginebra sobre derechos humanos, buscan blancos civiles o disparan a discreción contra las multitudes, matando o hiriendo docenas de paisanos, mujeres y niños incluidos.

Segunda, las penalidades y privaciones que ahora sufren los civiles aumentan cuando las operaciones de auxilio internacionales deben suspenderse cuando los propios miembros de la ayuda se convierten en objetivos a abatir. En los años noventa, sólo en Ruanda y Chechenia cayeron más de 40 miembros del CICR, en comparación con los 15 que perdieron la vida en todos los conflictos habidos de 1945 a 1990.

Tercera, las sociedades inundadas de armas suelen encontrarse atrapadas en una atmósfera de violencia, incluso tras la terminación formal del conflicto. Para los ex combatientes jóvenes que han crecido en la guerra, sus armas se convierten en un símbolo de posición social y en un medio de ganarse la vida, sea mediante actos de delincuencia urbana o integrados en bandas criminales.



3. HAY AHORA MAS FABRICANTES de armas portátiles que nunca. Un estudio del número de empresas privadas fabricantes de armas portátiles a lo largo de los últimos cuarenta años muestra la expansión del mercado.

Entrevistando a su personal de campo y analizando los datos recogidos durante sus actuaciones en Camboya y Afganistán, el CICR reseñó la tasa altísima de muertos y heridos civiles causados por las armas portátiles y ligeras, durante los combates y tras el armisticio. Examinando los datos de Afganistán, por ejemplo, los investigadores descubrieron que las heridas por arma de fuego decrecieron sólo un tercio tras el fin de la guerra civil; los muertos por disparos aumentaron. En muchas de las sociedades, terminadas las hostilidades, hasta un 70 por ciento de la totalidad de los civiles sigue en posesión de armas militares, principalmente fusiles de asalto como los M16 y AK-47. Esas armas, asevera el CIRC, responden de más del 60 por ciento del total de muertos y heridos por arma de fuego en los conflictos internos; mucho más que el conjunto de minas terrestres, morteros, granadas, artillería y sistemas de armas de mayor entidad. De El Salvador a Sudáfrica la historia se repite. Cerrados los conflictos internos siguen durante años unas tasas elevadas de violencia criminal y social posibilitada por la facilidad de acceso a armas portátiles y ligeras.

Ante el caos y la devastación resultantes de la afluencia de armas portátiles y ligeras, los políticos apremian

ahora a su control. En julio de 1998 representantes de 21 países (entre ellos, EE.UU., Brasil, Reino Unido, Alemania, Japón, México y Sudáfrica) se reunieron en Oslo y acordaron trabajar juntos para frenar la proliferación de esas armas. La ONU apeló a sus estados miembros para que endurecieran sus leyes sobre exportación de municiones y cooperaran en los esfuerzos para suprimir el comercio ilegal de armas portátiles. Todos están de acuerdo en que algo debe hacerse; unanimidad que se rompe en torno a qué debe hacerse. Pese a ello, los expertos en armas y otras instancias comienzan a esbozar métodos prácticos y aplicables para controlar el comercio de armas portátiles.

Los defensores del control de armas portátiles han abandonado la idea de promulgar un instrumento único y de validez general como el tratado de las minas terrestres. Este, al firmarse en 1997, parecía un modelo natural para un acuerdo que prohibiese la mayoría de las exportaciones de armas portátiles y ligeras. Pero la eliminación de todas las transferencias de armas portátiles entre los estados nunca recibiría el respaldo de los países que dependen de las importaciones para las necesidades básicas de sus fuerzas militares y policiales. Además, China, Rusia y otros consideran las armas como artículos legítimos; se oponen, pues, a aceptar cualquier medida que restrinja ese comercio. De ahí que el planteamiento preferido ponga el acento en un acuerdo multidimensional orientado a eliminar las transferencias ilegales de armas y a establecer unos controles más rigurosos en las ventas legales, fomentando a la vez las reformas democráticas y el desarrollo económico en las sociedades más pobres y muy divididas.

Con la mira sobre el control de armas

Ninguno de los proyectos más aceptados describe cómo lograr unos objetivos tan amplios. Pero los expertos en control de armamentos están de acuerdo en cinco principios. Primero, para identificar cualquier tendencia peligrosa (el crecimiento de las reservas de armas en zonas de inestabilidad, por citar un ejemplo) debe disponerse de la información oportuna sobre el tráfico global de armas portátiles. Hay suministradores que hacen públicos algunos datos sobre entregas de armas portátiles (EE.UU. y Canadá merecen destacarse a este respecto), mas por ahora carecemos de un sistema de declaración internacional. El único mecanismo existente de esta clase, el Registro de Armas Comunes de la ONU, cubre sólo las armas de gran tamaño.

Segundo, los suministradores principales de equipos militares deben adoptar unas normas estrictas para la exportación de armas por los canales legales. No obstante la dispersión de la industria de armas portátiles y ligeras, del grueso de la venta de armas en el mercado internacional responden una docena de países; entre éstos, los cinco miembros permanentes del Consejo de Seguridad de la ONU (EE.UU., Rusia, China, Reino Unido y Francia), además de otros países europeos, asiáticos e iberoamericanos. Si esas naciones acordaran un sistema común de limitación de las exportaciones, la venta en zonas de inestabilidad se debilitaría sustancialmente. Algunas armas seguirían circulando por canales clandestinos, pero las transacciones en gran escala se hallarían sometidas a la supervisión internacional.

Tercero, ningún sistema regulador del suministro de armas puede ser del todo eficaz sin un esfuerzo para aminorar la demanda global de armas, especialmente en las zonas de conflictividad periódica. Se ha avanzado de modo importante en Africa Occidental, escenario de los conflictos más funestos de los años noventa. En 1998, estimulada por Alfa Oumar Konaré, el visionario presidente de Malí, la Comunidad Económica de Estados de Africa Occidental (CEEAO) adoptó una moratoria de tres años sobre la importación, exportación y manufactura de armas portátiles y ligeras. Era la primera vez que un bloque de estados importadores de grandes cantidades de armas ligeras adoptaba una medida similar; un modelo importante que otros podrían emular. Ya los estados miembros de la Comunidad de Desarrollo de Africa Meridional (CDAM) han considerado dar el paso y un grupo de países de Africa Oriental se reunieron en Kenia en marzo del año en curso para tratar de una iniciativa parecida.



4. EL CAMPO COLOMBIANO EL 9 DE ABRIL DE 1994: miembros del grupo insurgente CRS, escisión del ELN (Ejército de Liberación Nacional), entregan las armas en el marco de un programa gubernamental.

Cuarto, los esfuerzos para controlar el comercio legal tendrán un efecto limitado si no se toman medidas para erradicar el mercado negro. La Organización de Estados Americanos (OEA) se ha empeñado en frenar ese comercio. Reconociendo la estrecha vinculación entre ventas ilegales de armas, tráfico de drogas y delincuencia criminal, la OEA acordó en 1997 requerir a sus integrantes para que sancionaran la producción y transferencias no autorizadas de armas portátiles y para que cooperasen en la supresión del mercado negro.

Por último, tal como han aprendido los miembros de los cuerpos pacificadores de la ONU en Angola, Ruanda, Somalia y otros lugares, los acuerdos de paz pueden coadyuvar a reintegrar a la economía civil a los antiguos combatientes, para evitar que se vean arrastrados al mercenariado, la insurgencia o el bandidaje. La recogida y destrucción de las armas usadas y sobrantes quizá sea el aspecto más espinoso del problema. Sin embargo, cada estado por su cuenta y las organizaciones no gubernamentales han empezado a idear y ensayar posibles soluciones, verbigracia, programas de “recompra” de armas y otros. La Unión Europea y el Banco Mundial han prometido también su ayuda para el desarrollo de programas de formación laboral y otros servicios para los ex combatientes que soliciten su reincorporación a la sociedad civil en zonas azotadas por la guerra de Africa e Iberoamérica.

INFORME ESPECIAL: UN NUEVO TIPO DE GUERRA

HERIDAS INVISIBLES

La investigación médica ha comenzado a prestar atención a los efectos de la guerra sobre la salud mental de la población civil

Richard F. Mollica

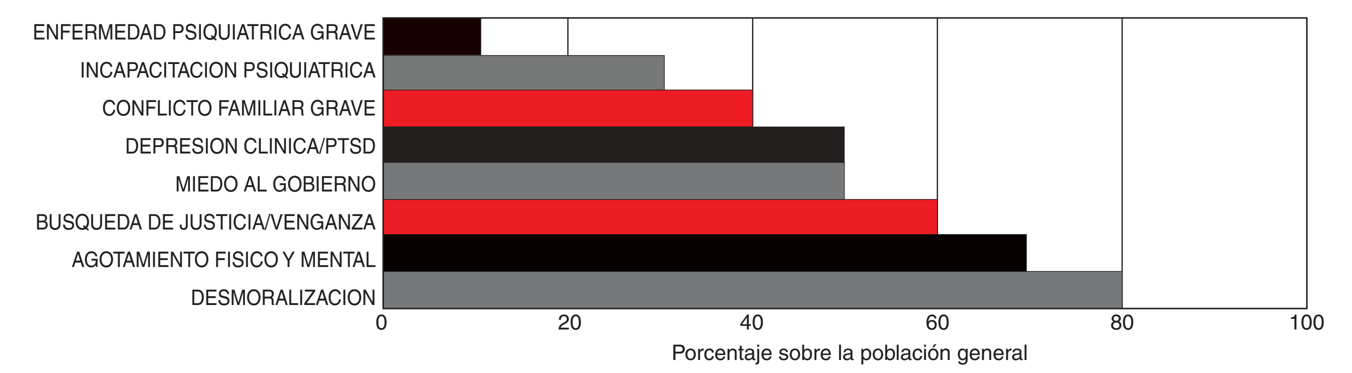
Los Jémeres Rojos habían ejecutado a toda su familia. La paliza recibida la dejaron inconsciente sobre los cuerpos de sus seres queridos. Cuando mi primera paciente camboyana me contó esta historia con todo lujo de detalles en 1981, mi reacción inicial fue de rechazo. No podía ser cierto. Parecía irreal, como si se tratara de una escena sacada de una película de terror. Mi instinto me decía que no debía darle crédito.

Aquel sentimiento mío era un ejemplo de lo que el novelista Herman Wouk ha llamado “la voluntad de no creer”. Este tipo de respuesta es una reacción frecuente ante los relatos de crueldad humana y de sufrimiento emocional, y una de las razones por las que los líderes políticos, los que trabajan en ayuda humanitaria e incluso los psiquiatras no han sido capaces de apreciar la profundidad que encierran los traumatismos de la guerra. Suele parangonarse con una cinta elástica. La guerra es el infierno, pero nosotros pensamos que, una vez que el conflicto ha terminado, los afectados volverán a la normalidad. Permanecerán las lesiones físicas, pero la ansiedad y el miedo que acompañan cualquier situación amenazante para la vida deben desaparecer, en cuanto cesa el peligro inmediato. El público, en general, mantiene la misma actitud. En esencia, el mensaje desde el mundo exterior a las víctimas de la guerra ha sido: Resiste, que esto pasará.

Tal se pensaba sobre la mayoría de los sucesos dramáticos, desde el abuso infantil hasta la violación. Ahora conocemos mejor lo que sucede. Experiencias horrorosas pueden causar daños que no siempre curan de modo natural; las víctimas pueden necesitar consejos, ayuda económica y medicación. La enfermedad provocada por el estrés postraumático (conocida con las siglas PTSD correspondientes a “post-traumatic stress disorder”) se reconoció oficialmente en 1980, debido en parte a la experiencia de los veteranos de los EE.UU. en las guerras de Corea del Norte y del Vietnam. Pero ha sido en los últimos veinte años cuando los investigadores han documentado las consecuencias sociales y emocionales de la guerra en la población civil. Estos hallazgos están revolucionando la recuperación de las sociedades devastadas por la guerra.

En 1988, nuestro departamento de la Universidad de Harvard, subvencionado por la Federación Mundial de Salud Mental, envió un equipo psiquiátrico a la Posición 2, el mayor campo de refugiados de Camboya, junto a la frontera entre Tailandia y Camboya. Realizamos entrevistas a 993 residentes del campo, quienes nos relataron un total de 15.000 sucesos traumáticos diferentes, tales como raptos, prisión, tortura y violación. Las autoridades internacionales encargadas de la protección y el mantenimiento económico del campo, sin embargo, no habían hecho previsiones para ningún tipo de servicios de salud mental. Errores similares afectan a otros campos de refugiados en otros lugares del mundo. Con el tiempo, la razón de este olvido se hizo evidente: los efectos de la violencia en masa sobre la salud mental eran invisibles.

Dicho de forma muy simple, es más fácil contar cadáveres y extremidades amputadas que mentes gravemente dañadas. La gente con lesiones traumáticas busca con presteza la asistencia médica, pero el estigma de la enfermedad mental es profundo, de modo que lo habitual es que los individuos traumatizados eviten a los psiquiatras. La ausencia de criterios estandarizados para



1. EN UNA SOCIEDAD EN GUERRA casi todo el mundo se encuentra traumatizado en mayor o menor medida; la gama abarca desde la enfermedad psiquiátrica grave (como la psicosis) hasta la depresión clínica y la enfermedad por estrés postraumático. De acuerdo con la estadística, elaborada con datos de recientes guerras civiles, la mayoría de los integrantes de la población civil está exhausta, desesperanzada y desconfiada; en ese tejido social las secuelas de la destrucción sufrida permanecerán como mínimo durante una generación.

las afecciones de la salud mental y las diferencias entre las distintas culturas han contribuido también a que este problema pase inadvertido. Los diagnósticos establecidos de acuerdo con la cultura local no se compaginan con las categorías de la medicina occidental.

Los supervivientes de las violencias masivas acostumbran mantener ocultos sus sentimientos, pues temen, no sin razón, ser malinterpretados. En sus memorias, Primo Levi describe sus fantasías cuando se encontraba en Auschwitz. Soñaba que se reunía de nuevo con su familia, pero también lo temía: "Es un intenso placer físico inexpresable estar en casa, entre personas amigas, y tener muchas cosas que contar; aunque esto no me resulta de ayuda, al darme cuenta de que mis oyentes no me siguen. De hecho permanecen en absoluta indiferencia: hablan tranquilamente de otras cosas como si yo no estuviera allí. Mi hermana me mira, se levanta y se va sin mediar palabra; el sufrimiento emocional es insoportable."

El escepticismo y el desinterés de la gente son, por desgracia, muy reales. Reflejan el problema que todos tenemos para comprender el mal. ¿Cómo pueden cometer tales actos seres humanos? A falta de una respuesta tajante —y deseando evitar nuestros propios sentimientos de culpa— cambiamos de tema.

Cuando las agencias internacionales decidieron, por fin, preocuparse de la salud mental, buscaron primero soluciones simples. Pero prestar asistencia para la salud mental no es tan rectilíneo como reconstruir carreteras o tratar el paludismo. Sin embargo, los investigadores han abierto surco; seis descubrimientos básicos marcan el camino a seguir.

El primero es la evidente prevalencia de trastornos psiquiátricos graves entre la población civil superviviente de la guerra. Los avances en la epidemiología psiquiátrica —muestras aleatorias de poblaciones representativas, utilización de entrevistadores y desarrollo de criterios normalizados de diagnóstico, incluso transculturales— han producido, al menos, datos numéricos fiables. Nuestro estudio con los refugiados camboyanos revela niveles de depresión clínica aguda y PTSD del 68 y del 37 por ciento, respectivamente. Cifras bastante parecidas se han encontrado entre los refugiados de Bután que viven en Nepal y en los refugiados de Bosnia instalados en Croacia. Por mor de comparación, en las comunidades no traumatizadas, unas tasas del 10 por ciento de depresión y 8 por ciento de PTSD (a lo largo de la vida) se considerarían muy altas.

El segundo descubrimiento consiste en la posibilidad de una medición rigurosa de la naturaleza del traumatismo. A los psiquiatras les preocupa que la demostración de sus experiencias traumáticas provoque a los pacientes trastornos emocionales. También tienen la sensación de que los pacientes suelen facilitar datos inexactos, en el mejor de los casos exagerados y, en el peor, que sencillamente mientan. Pero a comienzos de los años ochenta surgió un nuevo movimiento en la medicina, asociado con las actividades de Amnistía Internacional. Los investigadores en derechos humanos desarrollaron un método sistemático que combinaba varios tipos de exámenes clínicos para comprobar la fiabilidad de los informes.

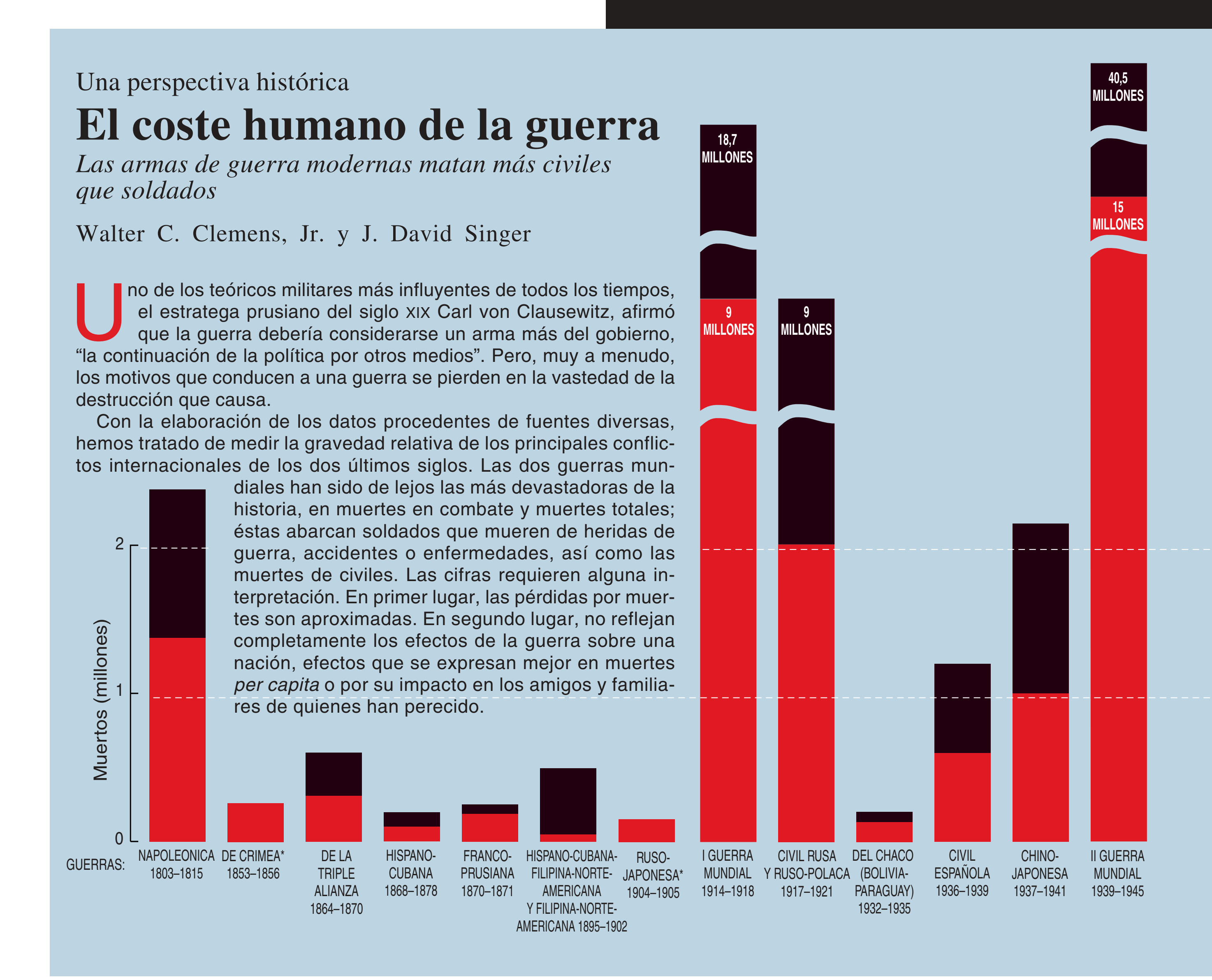
En ese contexto, nuestro servicio clínico observó que los pacientes psiquiátricos de Indochina que habían sufrido una horrible brutalidad eran incapaces de describir sus experiencias en una entrevista psiquiátrica abierta de tipo estándar. Por eso, tratamos de aplicar un simple instrumento de inquisición —el *Cuestionario de síntomas del Johns Hopkins* ("The Hopkins Symptom Checklist")— muy empleado para la población general desde los años cincuenta. Se tarda unos 15 minutos en rellenar el cuestionario, donde se pregunta si el interrogado se encuentra hundido, le cuesta conciliar el sueño o le asaltan ideas de suicidio, entre otros apartados de parecido tenor. Cuando entregamos a los pacientes una versión en idioma indonesio del listado, relataron sus reacciones emocionales con poco distrés. Una variante del mismo —*Cuestionario de trauma de Harvard* ("Harvard Trauma Questionnaire")— se centra en los incidentes traumáticos y los síntomas de PTSD. Se dispone ya de este cuestionario en más de 25 idiomas, adaptado a cada contexto cultural y comprobado empíricamente.



2. DRAGOBIL, KOSOVO, 28 DE OCTUBRE DE 1998: mujeres de etnia albanesa lloran sobre el cuerpo de Ali Murat Pacarizi, un soldado de 20 años de edad del Ejército de Liberación de Kosovo, muerto mientras trataba de desactivar una bomba trampa serbia.

Usar el idioma adecuado

El tercer hallazgo se debe a los antropólogos médicos, que han codificado los conceptos no-occidentales de los trastornos de la salud mental. En muchas sociedades, los curanderos tradicionales y los ancianos de la comunidad, más que los médicos, son la principal fuente de asistencia sanitaria, especialmente de la salud mental. Pero algunos pacientes trascienden las posibilidades de asistencia: ni los curanderos tradicionales consiguen sanarlos ni los médicos reconocen sus vagas molestias somáticas como síntomas de una enfermedad mental. Gracias a exhaustivos trabajos de campo realizados en Camboya, Uganda y Zimbabwe, se ha catalogado un amplio abanico de diagnósticos populares asociados con tras-



Una perspectiva histórica

El coste humano de la guerra

Las armas de guerra modernas matan más civiles que soldados

Walter C. Clemens, Jr. y J. David Singer

Uno de los teóricos militares más influyentes de todos los tiempos, el estratega prusiano del siglo XIX Carl von Clausewitz, afirmó que la guerra debería considerarse un arma más del gobierno, "la continuación de la política por otros medios". Pero, muy a menudo, los motivos que conducen a una guerra se pierden en la vastedad de la destrucción que causa.

Con la elaboración de los datos procedentes de fuentes diversas, hemos tratado de medir la gravedad relativa de los principales conflictos internacionales de los dos últimos siglos. Las dos guerras mundiales han sido de lejos las más devastadoras de la historia, en muertes en combate y muertes totales; éstas abarcan soldados que mueren de heridas de guerra, accidentes o enfermedades, así como las muertes de civiles. Las cifras requieren alguna interpretación. En primer lugar, las pérdidas por muertes son aproximadas. En segundo lugar, no reflejan completamente los efectos de la guerra sobre una nación, efectos que se expresan mejor en muertes *per capita* o por su impacto en los amigos y familiares de quienes han perecido.

tornos emocionales. Nuestro equipo ha publicado una enciclopedia de estos diagnósticos para Camboya, de modo que los médicos occidentales puedan identificar la enfermedad mental en su idioma local.

Sabemos ahora, y ése es el cuarto descubrimiento, que ciertas experiencias traumáticas específicas son más propicias que otras para provocar una depresión y un PTSD. Entre los refugiados camboyanos de la Posición 2 los incidentes más nocivos incluyen golpes en la cabeza, otras lesiones físicas, encarcelación y la asistencia obligada como testigo al asesinato o a la muerte por inanición de un niño. Menos secuelas dejaron la falta de refugio y la presencia como testigo de violencia de adultos.

En quinto lugar, las agresiones traumáticas más intensas causan lesiones permanentes en el cerebro. Al principio de la década de los sesenta, el grupo encabezado por Leo Eitinger descubrió una relación entre traumatismos craneoencefálicos y síntomas psiquiátricos en los supervivientes de los campos de concentración nazis. De acuerdo con investigaciones más recientes, las palizas sufridas por los soldados americanos durante la segunda guerra mundial y en las guerras de Corea y del Vietnam provocaron a menudo lesiones cerebrales. De modo similar, de 200 civiles supervivientes de torturas examinados por el equipo de Ole Rasmussen, el 64 por ciento padecía déficits neurológicos. Incluso en ausencia de lesión física directa, el distrés emocional puede retraer el cerebro. Los escasos estudios disponibles de individuos con PTSD han revelado que ciertas estructuras del cerebro, así el hipocampo, se retraen como consecuencia de los traumatismos. Algunos neurólogos han comenzado a relacionar estos primeros resultados con los síntomas persistentes y debilitantes del PTSD.

El sexto y último descubrimiento demuestra la conexión entre distrés mental y disfunción social. En 1999, mis colegas y yo analizamos la grave incapacidad asociada con distrés psiquiátrico entre los bosnios refugiados en Croacia. Uno de cada cuatro era incapaz de trabajar, cuidar de su familia o participar en otras actividades socialmente productivas.

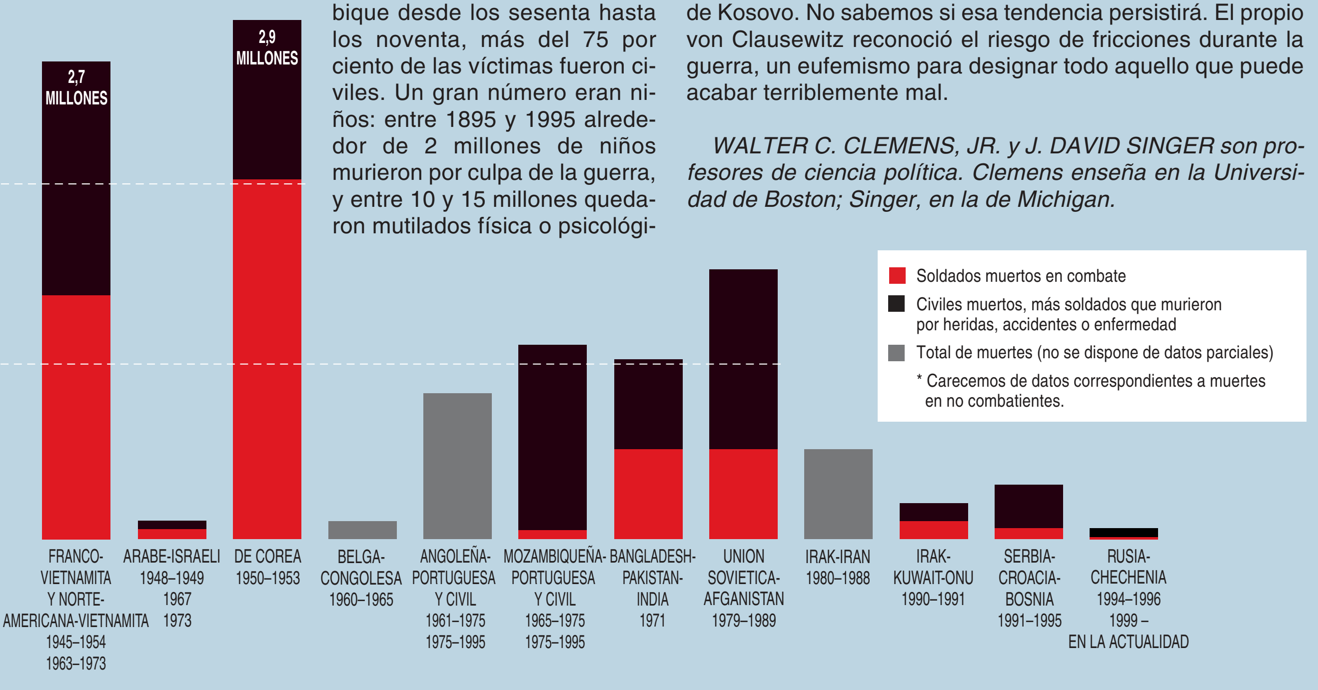
Se desconocen los efectos a largo plazo de esta crisis de la salud mental. Se han realizado muy pocos estudios longitudinales. De acuerdo con una encuesta reciente de una población holandesa, la gente que había sido objeto de la persecución nazi mostraba una tasa más elevada de PTSD en los siguientes 50 años. Estos

Del final de la Guerra de los Treinta Años en 1648 a la Revolución Francesa en 1789, los príncipes de Europa guerreaban con ejércitos relativamente pequeños. La Revolución Francesa, sin embargo, dio origen al concepto de "nación en armas". Iniciada al mismo tiempo, la Revolución Industrial convirtió a las ciudades y fábricas en objetivos prioritarios. En la mayoría de las guerras de los últimos cien años, las bajas civiles han superado las militares. Algunos países han perdido más del 10 por ciento de su población en un solo conflicto (por ejemplo, la Unión Soviética durante la segunda guerra mundial). América del Norte ha sido respetada debido a su situación geográfica.

Desde la segunda guerra mundial, Asia, Africa y el Oriente Medio se han convertido en los campos de batalla principales del mundo. En los conflictos que asolaron Angola y Mozambique desde los sesenta hasta los noventa, más del 75 por ciento de las víctimas fueron civiles. Un gran número eran niños: entre 1895 y 1995 alrededor de 2 millones de niños murieron por culpa de la guerra, y entre 10 y 15 millones quedaron mutilados física o psicológicamente. Desde 1945, muchos de los conflictos internacionales comenzaron siendo luchas civiles, lo que constituye una de las razones de tan elevada mortandad. Las guerras de Corea, Vietnam y Afganistán, entre otras, conflictos internos en su inicio, atrajeron pronto la intervención exterior.

En la "nueva enfermedad del mundo" de los noventa, la guerra se ha convertido a menudo en una empresa privada. En los conflictos que siguieron a la disgregación de Yugoslavia, por ejemplo, gran parte de los combates se libraron entre bandas de milicianos que servían por lealtad personal, esperanza de botín y deseos de venganza. Mientras tanto, las fuerzas armadas de los EE.UU. comienzan a implicarse en menor grado y prestan más bien ayuda para la pacificación. Los EE.UU. y sus aliados han reducido al mínimo sus propias bajas en la guerra contra Irak en 1991 y en la operación de Kosovo. No sabemos si esa tendencia persistirá. El propio von Clausewitz reconoció el riesgo de fricciones durante la guerra, un eufemismo para designar todo aquello que puede acabar terriblemente mal.

WALTER C. CLEMENS, JR. y J. DAVID SINGER son profesores de ciencia política. Clemens enseña en la Universidad de Boston; Singer, en la de Michigan.



traumatismos pueden tener efectos multigeneracionales: los investigadores han encontrado tasas más elevadas de PTSD en los hijos de supervivientes del Holocausto que en un grupo de judíos no traumatizados. Pero la relación de causa a efecto sigue siendo oscura. ¿Fue causado directamente el PTSD por el horror nazi? ¿Han sido los supervivientes de este horror más vulnerables a posteriores traumatismos? ¿Depende acaso esta correlación de otras variables? Para comprender las consecuencias de la guerra a largo plazo, estamos llevando a cabo un estudio longitudinal en Bosnia.

El punto de partida es que mientras sólo un pequeño porcentaje de supervivientes de violencia masiva sufre graves enfermedades mentales que requieren asistencia psiquiátrica urgente, la gran mayoría experimenta problemas mentales de baja intensidad, aunque de larga duración. Para que una sociedad se rehaga, no puede pasarse por alto esta mayoría. Durante bastante tiempo después de terminada la guerra puede persistir una abulia física y una falta de autoestima generalizadas. Lo mismo que el paludismo y otras enfermedades crónicas, los trastornos mentales pueden ser un lastre para el desarrollo económico de un país.

Hace menos de un lustro que las organizaciones internacionales empezaron a tomar conciencia de ese fenómeno. El Banco Mundial, en particular, ha reconocido que los viejos modelos de desarrollo no sirven en las naciones devastadas por las guerras y que se requieren nuevos planteamientos. Las agencias internacionales de ayuda han establecido, en Camboya y en Timor oriental, clínicas para la salud mental asentadas en las comunidades. Se han abierto espacios de televisión, en Sudáfrica y Bosnia, para que los médicos locales den a conocer los problemas y las posibilidades de asistencia. Nuestro propio programa está ahora creando un escenario de proyectos de microempresa que facilite la reincorporación laboral de personas deprimidas. Tales esfuerzos son cruciales para romper el círculo vicioso de letargo y venganza que destruye una gran parte de nuestro globo.

RICHARD F. MOLLICA enseña psiquiatría en la facultad de medicina de Harvard. En 1981 cofundó el *Programa Harvard para los Traumatismos de los Refugiados*, uno de los primeros centros clínicos de los EE.UU. destinados a supervivientes de violencia masiva y tortura.

LOS NIÑOS

¿Cómo se convierte a un niño en un asesino? Grupos armados de todo el mundo han adoptado una costumbre siniestra: arrebatan niños a sus familias, los someten a vejaciones y los "ascienden" a combatientes

Los guerrilleros mataron a mi madre. Y a mis hermanos también. Me llevaron a su campamento. Sí, yo estaba con los guerrilleros. Tenía un fusil. El jefe me enseñó a usarlo. Me pegaba. Yo tenía un fusil para matar. Mataba a gente y a soldados. No me gustaba.

—Chico del norte de Uganda, secuestrado a los 6 años por fuerzas contrarias al gobierno

Para los jefes militares de algunos de los países más pobres del mundo, no hay estrategia cabal sin niños. Son más ágiles, se les manipula mejor que a los soldados adultos y cuesta menos sacrificarlos. Pueden montar guardia en controles peligrosos, rastrear minas e infiltrarse en las líneas enemigas. Y es posible sacarles del cuerpo su tendencia natural al compañerismo.

Nos gustaría creer que estas situaciones son raras, aisladas, pero no es así. Cada día, fuerzas armadas secuestran y reclutan niños en los cuatro puntos cardinales. Se calcula que 300.000 niños toman parte en 36 conflictos abiertos (o recién concluidos) en Asia, Europa, Africa, América Central, América del Sur y la ex Unión Soviética. Alrededor del 80 por ciento de los soldados rebeldes de Sierra Leona tienen entre 7 y 14 años. En la guerra civil de Liberia, de 1989 a 1997, entraron en combate niños de 7 años. En las hostilidades camboyanas, que acabaron, oficialmente, a principios de los años ochenta, un quinto de los soldados heridos tenía entre 10 y 14 años.

A la mayoría, las palabras "niño soldado" le recordarán imágenes de la televisión de un adolescente con un arma automática en las manos. Pero la realidad es que las fuerzas regulares y las guerrillas cuentan en sus filas con niños incluso de 6 años. Los más pequeños hacen de espías, enlaces, cocineros y concubinas; cuando hayan crecido un poco podrán tomar un arma y entrar en combate. Hay casos en que los niños son arrebatados de sus familias; otras veces deciden unirse al grupo armado para protegerse y sobrevivir.

Hemos visto la extensión y profundidad del problema de los soldados infantiles en casi dos decenios de trabajo en Afganistán, Ruanda, Mozambique y Camboya. Pero, pese a que es general el uso de chicos y chicas de menos de 18 años como soldados, y pese a los recientes avances del derecho internacional contra esta práctica, su tormento nunca se ha mencionado en ningún tratado de paz o plan de desmovilización. En Mozambique, por ejemplo, donde un cuarto de los soldados que han actuado en los tres lustros largos que duró la guerra civil fueron reclutados cuando tenían menos de 18 años, el tratado de paz no reconocía oficialmente la participación de los niños soldados. El gobierno restableció el servicio militar obligatorio el año pasado. Es muy probable que quienes tenían entre 7 y 13 años durante la guerra civil se vean ahora llamados legalmente a volver a los cuarteles.

La desidia ha quebrado el desarrollo social y psicológico de una generación de niños. Mientras no sea una prioridad de la diplomacia internacional la erradicación de la milicia infantil, difícilmente podrán esas sociedades dejar atrás el pasado.

NEIL G. BOOTHBY y CHRISTINE M. KNUDSEN son, respectivamente, el director y una de las responsables de programas del departamento "Niños en Crisis" de la organización "Salvar los Niños" (*Save the Children*), de Washington. Boothby, que enseñó en la Universidad Duke de 1986 a 1996, recibió en 1989 el Premio "Humanitario Internacional del Año" concedido por el Comité Internacional de la Cruz Roja. Knudsen dirigió el programa de emergencia de ACNUR para Chechenia de 1997 a 1999. Se ha encargado también de un programa de reconciliación en Burundi y efectuó investigaciones sobre la reconstrucción de posguerra en otros países. Los dos han marcado el récord de viajes hechos durante la redacción de un artículo de *Investigación y Ciencia*: Afganistán, Etiopía, Kosovo, Liberia, Macedonia, Montenegro, Mozambique (donde Knudsen prestó ayuda durante las recientes inundaciones), Pakistán, Serbia, Sierra Leona, Somalia y Timor oriental y occidental.

La guerra como forma de vida

Casi todas las guerras se registran hoy en países en vías de desarrollo, donde ya son de por sí limitados los recursos sanitarios y educativos. De las diez naciones con una mayor tasa de mortandad infantil, siete están envueltas en un conflicto o lo han estado en el postrer lustro. No hay nación del Africa subsahariana que no haya sido devastada por la guerra o que no sea fronteriza con otra que lo haya sido. Además, esas gue-

1. BUTEMBO, ZAIRE, 11 DE DICIEMBRE DE 1996: enrolados en las filas del Mayi-Mayi de las fuerzas rebeldes de Laurent Kabila, aparecen subidos a un camión que parte hacia el frente, en el este de Zaire (ahora República Democrática del Congo).

DEL FUSIL

Neil G. Boothby y Christine M. Knudsen



rras suelen durar una generación o más, y los niños que crecen rodeados por la guerra la perciben como una forma de vida normal.

En circunstancias tan inestables, los chicos corren un riesgo enorme de ser reclutados. Puede que, forzadas sus familias a huir de casa o asesinadas, queden desamparados; solos, tendrán que valerse por sí mismos, y a menudo sin otra opción que ingresar en un grupo armado o seguir a un adulto hasta el frente.

Así lo explicaba un muchacho de la República Democrática del Congo: "Me uní al ejército de Kabila [el presidente Laurent Kabila] a los 13 años porque habían saqueado mi casa y mis padres se habían ido. Como tenía que apañármelas solo, decidí hacerme soldado." Las Naciones Unidas observaron en Camboya que, en su mayor parte, los niños soldados eran huérfanos o venían de familias muy pobres; incorporarse voluntariamente al ejército era una forma de poder comer y ganar algo de dinero para los parientes que aún vivían.



2. CAMPAMENTO DE KA MAR PA LAW, MYANMAR, 6 de diciembre de 1999: Luther Htoo, de 12 años, sostiene un rifle M16 mientras su hermano mellizo Johnny (*derecha*) le mira. Los Htoo dirigen el Ejército de Dios, un grupo rebelde de la etnia Karen de Birmania (la actual Myanmar).

Las familias a veces alentaban a los niños a alistarse porque es una oportunidad de progreso económico y social. Y hay adolescentes ansiosos de poder y prestigio que se enrolan por propia iniciativa.

Pero no hemos de olvidar que los niños, hasta cuando se incorporan "voluntariamente", tienen una edad demasiado corta para ser plenamente conscientes de los riesgos y de sus intereses genuinos. Sacar a relucir el "derecho" de los niños a unirse a un grupo armado no es más que una excusa de los explotadores. En muchas zonas la distinción entre enrolamiento voluntario y forzoso de niños y adolescentes carece de sentido.

A lo largo de los 10 últimos años, grupos militares, gubernamentales o no, han raptado o reclutado a la fuerza miles de niños. Los ejemplos más sangrantes se dan hoy en Sierra Leona y norte de Uganda, donde las milicias los secuestran por sistema para aumentar sus filas y aterrorizar las aldeas. Una chica de 13 años del norte de Uganda contaba cómo la raptaron: "Fue terrible. Descuartizaron con *pangas* [cuchillos largos] a unos niños que no tenían fuerzas para andar y los dejaron morir en el camino. Me asusté muchísimo. En el monte me entregaron a un hombre. Si no mostrabas respeto, te pegaban una paliza."

A menudo preceden a las campañas de reclutamiento voluntario y forzoso unos programas de adoctrinamiento, a cargo de los medios de comunicación y las escuelas. Durante la guerra entre Irán e Irak se instruyó a miles de chicos de diez u once años de ambos bandos en la bondad del martirio. Luego se los mandaba a la muerte. Consigo llevaban unas llaves que les habían dado sus maestros; con ellas, les decían, entrarían en el paraíso islámico. Los líderes afganos exiliados en Pakistán creían que la falta de formación religiosa del pueblo constituía la principal razón de que los comunistas se hubiesen hecho con el control de su tierra. Un grupo de resistencia afgano abrió un campamento cerca de Peshawar; allí moldearon a unos 500 chicos, en su mayoría huérfanos de guerra, y los convirtieron en la siguiente generación de guerreros. Los maestros, una vara en una mano, un rosario musulmán en la otra, pedían a los niños que recitasen la tabla de multiplicar, las maldades del comunismo y qué harían cuando fuesen mayores. "Ahora soy pequeño, por eso debo estudiar", nos decía un chico de 10 años. "Cuando sea ya mayor y pueda coger un fusil, me uniré a la guerra santa y vengaré la muerte de mi padre." No podían dejar el campo mientras no tuviesen edad para luchar (por lo común, 13 años).

Así se destruye una persona

Nuestro trabajo en Mozambique, entre 1988 y 1995, ha aportado resultados de interés para conocer los mecanismos de que se valen los grupos guerrilleros para conformar los niños a una vida de violencia. Pusimos en marcha un programa de reintegración en la sociedad de unos cien soldados infantiles. Dos terceras partes de ellos habían sido secuestrados por el Renamo (Resistencia Nacional de Mozambique). Una vez en los campamentos de la insurgencia, se esperaba de ellos que colaborasen con los adultos sin preguntas ni emociones. Se los recompensaba con más comida y comodidades, y ascendiéndolos de sirvientes a guardaespaldas y de guardaespaldas a combatientes. Los adultos recurrían al maltrato físico y a la humillación como instrumentos de adoctrinamiento. Un chico de 14 años recordaba: "A veces, sólo por en-

¿Un fenómeno reciente?

Venga, niños, luchad hasta la muerte

Cuando hablamos de niños soldados, suelen preguntarnos: ¿No es un problema que viene de tiempos inmemoriales? No. El enrolamiento de niños ha tenido sus altos y sus bajos a lo largo del milenio, pero nunca ha desempeñado un papel sustancial en las guerras.

En la Europa feudal del Medievo sólo guerreaban los caballeros. Una vez ganada y perdida una batalla, los dos bandos se dispersaban y todos volvían a casa. El código de caballería prohibía que los civiles participasen, y los reyes imponían drásticos castigos a los nobles que reclutasen campesinos o niños. La Iglesia Católica se opuso a la famosa Cruzada de los Niños del siglo XIII. Fuera del sistema feudal, los burgueses de esa época, deseosos de obtener beneficios para sí y conseguir territorios, reclutaban a mercenarios, y a veces hasta a chicos. Pero el niño soldado es en realidad un producto de una era posterior, cuando ya existían ejércitos estables.

Las palabras de Federico el Grande en Zorndorf, en 1758, "Venga, niños, morid conmigo por la patria", venían a cuento porque muchos de sus soldados tenían poco más de trece o catorce años. En la Francia del siglo XVIII, a los hijos preadolescentes de la nobleza pobre apenas les quedaba otra salida que la milicia. Las cosas cambiaron a finales de esa centuria, con la revolución, porque al implantarse el servicio militar obligatorio libró a los niños de los frentes. Incluso durante la movilización social general, cerca ya del final de la revolución, los niños trabajaron sólo con mujeres y viejos en la retaguardia, en servicios sanitarios.

Hasta finales de los años treinta del siglo XX las guerras se disputaban en campos de batalla, entre ejércitos enfrentados. Los civiles no eran los blancos principales, aun cuando sufriesen hambre, saqueos y violencias. Pero la naturaleza de la guerra, sin embargo, cambió drásticamente durante la guerra civil española, en la que los aviones bombardearon pueblos y ciudades. La destrucción que comenzó en Durango y Guernica se extremó y las bombas nucleares mataron a 200.000 personas en Hiroshima y Nagasaki en 1945. Desencadenada la guerra contra las poblaciones civiles, se volvió a echar mano de los niños como combatientes. Varios miles trabajaron durante la segunda guerra mundial en los movimientos de resistencia; se los valoraba por su ingenio y temperamento. Los niños tomaron también las armas en muchas de las guerras de liberación de los años cincuenta y sesenta.

El movimiento moderno contra el enrolamiento infantil nació en los años setenta gracias al empeño de Dorothea E. Woods, de la Oficina Cuáquera de las Naciones Unidas, en Ginebra. Por desgracia, desde entonces el problema no ha hecho más que empeorar.

A mediados de los años ochenta, la rama noruega de *Save the Children* elaboró uno de los primeros programas modernos de rehabilitación de niños soldados. Se aplicó en Angola, pero quedó en nada cuando un acuerdo con el ejército angoleño para desmovilizar a los niños se vino abajo. Tres años después, la rama estadounidense de *Save the Children* ponía en marcha en Mozambique un programa que por fin iba a salir bien. Hoy, los miembros de la Alianza Internacional de esa institución llevan programas similares en Sri Lanka, Liberia y Sierra Leona, y el Fondo Cristiano Infantil en Angola. Los grupos de ayuda están sopesando nuevos proyectos en Colombia, Myanmar (antes Birmania) y Camboya. Mientras, cientos de grupos locales de esos países se esfuerzan por abordar por sí mismos la crisis.

—N.G.B. y C.M.K.

tretenerse, los guerrilleros obligaban a los niños a pelearse entre sí. Me consideraban un buen luchador porque era fuerte y peleaba para ganar. [Pero] una vez me obligaron a luchar contra un adulto y me ganó."

En la primera fase del adoctrinamiento, el Renamo buscaba endurecer los sentimientos de los niños, castigándolos si querían ayudar a los maltratados o mostraban la mínima compasión. Así relataba su experiencia del adoctrinamiento un chaval de 12 años: "Nos dijeron que no nos debían asustar la violencia ni la muerte y nos pusieron a prueba para ver si podíamos cumplir esa orden. Tres veces trajeron de vuelta al campamento a alguno que había intentado escapar de la base. Los guerrilleros nos llevaban a todos para que viésemos el castigo. Nos decían que no llorásemos o nos pegarían. Entonces el guerrillero daba al hombre en la cabeza con un hacha."

Mediante las palizas y la exposición a la violencia, el Renamo les inculcaba que no debían poner en entredicho la autoridad del grupo; aprendido eso, se los enseñaba a maltratar a otros. En palabras de un chico de 12 años: "Los guerrilleros pusieron a otros chicos de nuestra edad a vigilarnos. Antes habían estado en nuestro grupo y también les habían pegado. Ahora estaban al cargo ellos y era aún peor. Se lo pasaban bien haciéndonos daño. Cuando pillaban a uno de nosotros haciendo algo, los guerrilleros lo ponían delante de los demás. Nos preguntaban qué había hecho mal. Al primero que respondiese correctamente le sacaban también. Le daban un palo o una bayoneta para que castigase al otro. A los demás nos decían que la próxima vez respondiésemos deprisa o también nos pegarían."

En Camboya, Liberia y El Salvador la grotesca iniciación de los niños soldados podía acabar en el ajusticiamiento de prisioneros o el asesinato incluso de miembros de su propia familia. En Uganda se les obligaba a cometer atrocidades en su aldea en el momento en que los reclutaban para que no tuviesen una fácil vía de escape del grupo armado. Según todos los testimonios, participaban al principio a regañadientes, pero sus sentimientos iniciales de miedo y culpa se transformaban bajo la mirada atenta de los adultos que los vigilaban. Como decía un líder de los Jémeres Rojos: "Suele llevar tiempo, pero no hay soldado más eficaz que un niño."

Tras dos o tres meses en los campamentos, los niños del Renamo empezaban su entrenamiento para el combate. Hacían instrucción diaria y aprendían a marchar, atacar, retirarse y disparar. Un niño de 11 años recordaba de este modo su entrenamiento militar: "La mayoría de los chicos eran pequeños y no habían disparado nunca un fusil. Los guerrilleros nos enseñaron a desmontar y montar el arma. Nos hacían formar y disparaban cerca de nuestros oídos para que no nos asustase el ruido. Luego teníamos que disparar nosotros y matábamos vacas. A los chicos que lo hacían mejor los nombraban jefes del grupo. Cuando otros hacían algo que no debían, los guerrilleros decían a esos nuevos jefes que los matasen. Así es como los chicos llegaban a ser jefes del Renamo."



3. SRINAGAR, CACHEMIRA, MARZO DE 1991: estos niños, enrolados en el movimiento rebelde de Cachemira, muestran unos rifles de asalto AK-47 y un lanzagranadas (*izquierda*).

con su confianza fundamental en los valores tradicionales intacta. Hasta los que habían cometido actos de violencia seguían definiéndose como víctimas, no como miembros del Renamo. Una vez liberados, la mayoría mostró al principio un comportamiento agresivo y desconfianza hacia los adultos. Pero tales comportamientos y actitudes remitieron enseguida; en los comienzos de su recuperación manifestaron más remordimientos y trastornos de estrés postraumático que conductas antisociales.

Por el contrario, los que pasaron un año o más en los campamentos de Renamo parecían haber cruzado cierto umbral. La idea que se hacían de sí mismos se confundía con la de sus captores. Las condiciones fueron tan adversas y el adoctrinamiento del Renamo tan persistente, que habían acabado por considerarse parte del grupo. Como decía un chico de 15 años: "Volví a nacer en el campamento. Aun cuando hubiera podido escapar, nunca habría podido volver a casa, después de lo que había visto y hecho." Fuera de contexto, estas frases podrían sonar a expresión de remordimiento, pero el adolescente exponía simplemente un hecho.

Con armas automáticas ligeras y fáciles de usar, tan eficaz resulta el pequeño como el grande en un combate a corta distancia. La guerrilla aprovecha, además, su agilidad y docilidad. Aunque en general son malos soldados. Sufren un porcentaje mayor de bajas, en parte porque al no tener madurez ni experiencia corren riesgos innecesarios. Además, el cuerpo de un niño se halla más expuesto a las complicaciones cuando está herido, y es más fácil que enferme en las rudas condiciones de los campamentos militares: dieta inadecuada, falta de higiene y de cuidados sanitarios, duro entrenamiento y castigos físicos. Los mandos suelen considerarlos auténtica carne de cañón; por eso se les entrena menos y deben acometer las tareas más peligrosas, como rastrear los campos de minas o espiar los campamentos enemigos.

El fin de la infancia

Los defensores de los derechos humanos saben poco del destino de los niños que participan en la violencia de masas. Podemos sospechar que sufrirán una quiebra moral, pero, por lo que se ve, no siempre es así. En estudios de Irlanda del Norte se ha comprobado que las ideas sociales y morales de los niños tienen aguante; los lazos familiares y los valores religiosos siguen siendo fuertes en medio de la violencia. Resultado parecido se ha obtenido en Sudáfrica. Durante la larga lucha contra el apartheid, los niños solían engañar a las fuerzas de seguridad; algunos participaron directamente en confrontaciones violentas con la policía o con miembros de comunidades rivales. Esos mismos niños, sin embargo, conservaron en general la capacidad esencial de distinguir entre la violencia por causas justas e injustas (aunque en los últimos años los psicólogos han percibido allá una tendencia creciente a la formación de bandas agresivas). En un trabajo realizado en 1986 sobre formación de las ideas políticas en los niños, Robert Coles sostenía que las crisis sociales podían incluso estimular precozmente el desarrollo moral de algunos.

La reacción moral que observamos en Mozambique no dependía tanto del tiempo en que ejercieron acciones armadas, cuanto del que pasaron en los campamentos de la guerrilla. En general, los que estuvieron menos de seis meses parecían salir de la experiencia

La mayoría de estos niños decía creer que el uso generalizado de la violencia estaba "mal", pero seguía practicándola; no tenía medio mejor de ejercer un poco de control social e influir en los demás. Uno de 13 años nos contaba que al Renamo no le interesaba el bienestar de la gente, sino que utilizaba a las personas "como animales" para lograr sus objetivos. Afirmaba también que creía que eso estaba mal. A la tarde siguiente, sin embargo, tuvimos que pararle los pies porque le estaba dando una paliza brutal a otro menor que se resistía a robar comida para él. Conocía la diferencia entre el bien y el mal, pero seguía valiéndose de la fuerza y de la intimidación para manipular a los demás. Los psicólogos han observado una discordancia parecida entre creencias y acciones en situaciones menos extremas.

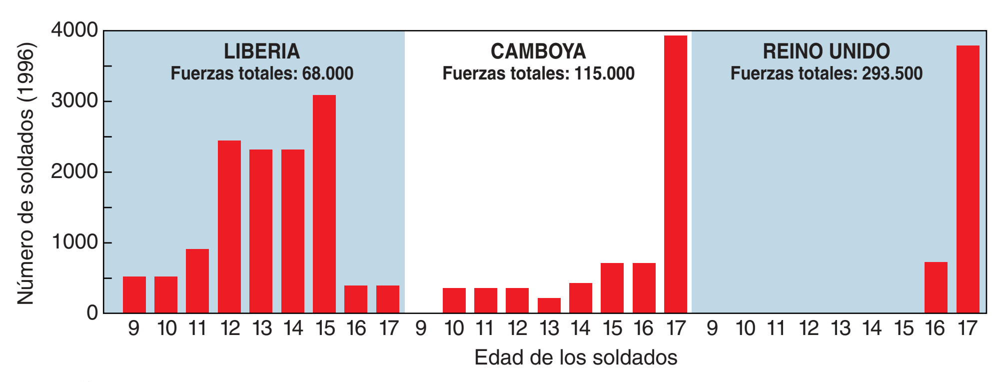
¿Podrán alguna vez reincorporarse a la sociedad? Quién sabe. De nuestro trabajo en Mozambique se desprende que, sin el concurso de asistentes sociales que les echen una mano, estos niños acabarán en pandillas y abrazarán ideologías que legitimarán y recompensarán su cólera, su miedo, su cinismo cargado de odio. Bandas y grupos armados florecen mucho tiempo después del fin oficial de la guerra.

Así en la guerra como en la paz

Está claro que toda nación, sociedad, grupo étnico o causa política que se valga de niños con fines paramilitares opta por una guerra total e ilimitada, que no repara en los medios para conseguir sus fines soberanistas. Con semejante actitud, un fenómeno moderno, sólo se acabará mediante una diplomacia eficaz y el desarrollo económico.

Varios tratados internacionales limitan o prohíben la participación de menores en los conflictos armados. Una enmienda de 1977 a las Convenciones de Ginebra y la Convención Internacional de 1989 sobre los Derechos del Niño (CDN) establecen como edad mínima para el

combatiente los 15 años. Todos los países del mundo han aprobado la CDN menos Estados Unidos y Somalia. (La administración Clinton la firmó en 1995, pero algunos senadores conservadores han impedido la ratificación por razones que no guardan relación con los niños soldados.) Estados Unidos se oponía a una proposición que pretendía que se estableciera un Protocolo Opcional que elevase la edad mínima, pero en enero del año en curso los negociadores estadounidenses aceptaron que ésta fuera de 18 años siempre y cuando se pueda reclutar a los 17. El protocolo aplica explícitamente las mismas pautas a todo grupo armado, no sólo a los ejércitos regulares. Los defensores de los derechos humanos lo consideran un gran avance hacia el reconocimiento universal de los derechos de los niños.



4. NIÑOS Y ADOLESCENTES nutren los grupos armados de Liberia y otros lugares de Africa; el porcentaje es menor en Camboya y otras zonas de Asia y América Latina. Varias naciones desarrolladas tienen reclutas de 16 años, pero ahora la edad mínima está subiendo.

En 1998 se dio otro paso importante cuando el grupo de diplomáticos que redactó el borrador del estatuto del Tribunal Criminal Internacional incluyó en su lista de crímenes de guerra el enrolamiento de niños (según especifica la CDN, los de menos de 15 años). Cuando el estatuto entre en vigor (una vez ratificado por diez países, como se prevé que ocurrirá a mediados de 2001), varias organizaciones, entre ellas *Save the Children*, tienen pensado hacer una campaña para que sean considerados como tales los de menos de 18, de acuerdo con el Protocolo Opcional.

Cierto es que una cosa es legislar y otra que se cumpla la ley. La Carta Africana de Derechos y Bienestar del Niño establece como edad mínima de enrolamiento los 18 años; sin embargo, africanos son más de la mitad de los países con niños en el frente. Muchas naciones violan sus propias normas. En Burundi, se han formado, alentado por el gobierno, compañías donde hay soldados de 12 a 25 años. Y los grupos rebeldes tienen aún menos ataduras que los gobiernos.

Exacerban el problema las incoherencias de la comunidad internacional. Aunque la reacción occidental a la limpieza étnica en los Balcanes fue lenta y desafortunada, al final se emitió un mensaje inequívoco. En Bosnia, Occidente tachó a los ingenieros de la limpieza étnica de criminales de guerra y expidió órdenes de arresto internacionales. Pero no se ha hecho nada parecido con Sierra Leona.

Cuando se estudian reconocimientos diplomáticos, pertenencias a organizaciones internacionales o admisiones a acuerdos comerciales y de desarrollo se ignora, sencillamente, la conducta de los estados con respecto a sus ciudadanos más jóvenes. Gobernantes que explotan a niños soldados, como el liberiano Charles Taylor o el congoleño Laurent Kabila, son aceptados por la comunidad internacional en pie de igualdad.

Quienes trabajamos con estos niños tendremos que investigar el papel de los grupos de ayuda en la reconstrucción de la sociedad. Los programas humanitarios pueden organizarse de manera que promuevan los derechos de la infancia. En última instancia, nada será más importante que el desarrollo económico. No es coincidencia que el reclutamiento forzoso ocurra más a menudo en sociedades donde el nivel de vida se ha estancado o ha decaído súbitamente. Quizá parezca que la eliminación de la pobreza es un objetivo utópico. No somos tan pesimistas. Como afirma el Informe del Desarrollo Humano de las Naciones Unidas de 1997, "erradicar la pobreza absoluta en el primer decenio del siglo XXI es ... un imperativo moral".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHILDREN OF MOZAMBIQUE: THE COST OF SURVIVAL. Neil Boothby, Abubacar Sultan y Peter Upton. Comité de los Refugiados de las Naciones Unidas, noviembre de 1991.

CHILDREN: THE INVISIBLE SOLDIERS. Rachel Brett y Margaret McCallin. Save the Children de Suecia, 1996.

MINEFIELDS IN THEIR HEARTS: THE MENTAL HEALTH OF CHILDREN IN WAR AND COMMUNAL VIOLENCE. Dirigido por Roberta J. Apfel y Bennett Simon. Yale University Press, 1996.

WAR AND PUBLIC HEALTH. Dirigido por Barry S. Levy y Victor W. Sidel. Oxford University Press, 1996.

DYNAMICS OF INTERNATIONAL RELATIONS: CONFLICT AND MUTUAL GAIN IN AN AGE OF GLOBAL INTERDEPENDENCE. Walter C. Clemens, Jr. Rowman and Littlefield Publishers, 1998.

NATIONS AT WAR: A SCIENTIFIC STUDY OF INTERNATIONAL CONFLICT. J. David Singer y Daniel S. Geller. Cambridge University Press, 1998.

LIGHT WEAPONS AND CIVIL CONFLICT. Dirigido por Jeffrey Boutwell y Michael T. Klare. Serie de la Comisión Carnegie para la Prevención de los Conflictos Mortíferos. Rowman and Littlefield Publishers, 1999.

DISABILITY ASSOCIATED WITH PSYCHIATRIC COMORBIDITY AND HEALTH STATUS IN BOSNIAN REFUGEES LIVING IN CROATIA. Richard F. Mollica et al., en *Journal of the American Medical Association*, vol. 282, n.º 5, págs. 433-439, 4 de agosto de 1999.

Interacciones positivas entre plantas

La asociación entre la retama y el marrubio en una zona semiárida del sur de España muestra que, más allá de la competencia darwinista, algunas plantas se procuran un mutuo beneficio

Francisco I. Pugnaire y María José Moro

Por experiencia sabe el campesino que no todas las plantas silvestres que crecen en el sembrado son perjudiciales. Las hay que le reportan beneficio. Compete al ecólogo dar un paso más y abordar, desde un planteamiento científico, las relaciones positivas y negativas entre plantas en el marco de la estructura y organización de las comunidades vegetales.

Desde hace años se ha venido prestando atención al papel de la competencia, la más importante de las interacciones negativas. Pero quedaban relegadas a un segundo plano las interacciones positivas, entendiendo por tales las relaciones no tróficas entre dos o más especies de las que sale beneficiada al menos una de ellas. Se llama facilitación a la interacción positiva en que sólo saca provecho una de las especies implicadas y mutualismo, si ambas ganan.

Un ejemplo claro de interacción positiva nos lo ofrecen las micorrizas, asociaciones de hongos con las raíces de árboles y arbustos que incrementan la capacidad de éstos para absorber nutrientes y agua del suelo. Otro ejemplo conocido lo presentan las asociaciones entre plantas superiores y sus polinizadores, esenciales para el mantenimiento del ecosistema. Pero no abundan los estudios que cuantifiquen los efectos ejercidos por las interacciones positivas en el ecosistema.

En las zonas semiáridas del sur de España algunos arbustos se rodean a menudo de un substrato de hierbas. Estas "islas de fertilidad", así se llaman frecuentemente, constituyen ejemplos excelentes de interacciones positivas y negativas. El conjunto del arbusto y las plantas circundantes contrastan con el área inmediata por la composición de especies y por la biomasa acumulada.

Se sabía que en las islas de fertilidad las hierbas se benefician de la mayor disponibilidad de agua y nutrientes que concurren bajo la copa del arbusto. Pero nunca se había estudiado el efecto que las hierbas ejercen sobre el arbusto.

Nosotros hemos abordado la dinámica de las comunidades vegetales en esos ecosistemas semiáridos y las interacciones entre especies con un enfoque cuantitativo. En particular, nos hemos centrado en las ramblas de la vertiente sur de la sierra de Los Filabres. Domina allí un clima semiárido, con una precipitación media anual inferior a los 250 milímetros; hay una estación seca muy pronunciada de junio a septiembre, con una temperatura media cercana a los 18 ºC.

El fondo de las ramblas, llano y arenoso, está frecuentemente ocupado por bosquetes de retama (*Retama sphaerocarpa*). Entre la vegetación que *R. sphaerocarpa* suele tener asociada destaca el marrubio (*Ballota nigra*), una planta perenne de la familia de las Lamiáceas de aspecto parecido a la menta.



1. LAS RAMBLAS de la vertiente sur de la sierra de Los Filabres, en la provincia de Almería, presentan en primavera un aspecto exuberante, muy alejado de lo que se supone tiene que ser un ambiente semiárido. Con frecuencia, la especie dominante en el fondo de la rambla es la retama (*Retama sphaerocarpa*).

En un principio pensábamos que las relaciones entre la retama y el marrubio serían de competencia, de lucha por los escasos recursos (agua y nutrientes) del sistema. Pero pronto apareció otro tipo de interacción más compleja. En el suelo arenoso de las partes bajas de las ramblas, los pies de *Ballota* que crecen bajo *Retama* son bastante mayores que los marrubios desperdigados y solitarios; tienen también más tallos, más flores y más hojas que los especímenes erráticos. Además, las hojas de los que se cobijan bajo el arbusto son más delgadas, lo que indica una mayor fertilidad. La cantidad total de nitrógeno (N) por planta y la concentración de N en los tejidos de *Ballota* también son más altas en los individuos a la sombra de la retama que en los desprotegidos (2,8 % frente a 2,4 %, respectivamente).

Por su parte, las retamas con *Ballota* debajo tienen mayor biomasa de hojas y mayor área por unidad de masa, indicio de una mayor fertilidad del suelo. (La “hoja” de la retama es, en realidad, el cladodio, tallo verde fotosintetizador.) Las retamas con marrubio en su base almacenan en comparación una mayor cantidad de nitrógeno, aunque la concentración en los tejidos es idéntica (2,6 %). Por último, las retamas con *Ballota* tienen más flores por rama, aunque las diferencias son sólo marginalmente significativas.

Los análisis de isótopos de nitrógeno descubren que *Retama* fija el nitrógeno atmosférico mediante asociación con bacterias del tipo *Rhizobium* en la raíz. Nitrógeno que pasa de la retama al marrubio a través de la descomposición de la hojarasca.

La interacción entre *Retama* y la vegetación que se refugia bajo su copa se refleja en los cambios operados en las características del suelo. En general, las propiedades del suelo sombreado difieren bastante del resto. Bajo la copa, la materia orgánica y la capacidad de retención de agua en el suelo son más altas y menor, la densidad aparente.

La hojarasca y los componentes finos del suelo (arcillas y limos) se acumulan bajo la copa y forman un montículo con una textura que facilita la aireación. Cuando se comparan los suelos de *Retama* acompañada de *Ballota* con otros suelos del arbusto sin el marrubio asociado, se observa que los niveles de materia orgánica y componentes finos del substrato son superiores en presencia de la lamiácea.



2. EL SUELO, POBRE, y la escasez de precipitaciones dan lugar a una baja productividad. El efecto benefactor de la retama hace que numerosas especies herbáceas y pequeños arbustos se cobijen bajo su copa. En esta fotografía del lecho de la rambla se observa el contraste entre la vegetación bajo *Retama* (con ejemplares de *Ballota nigra*) y la de los claros entre arbustos.

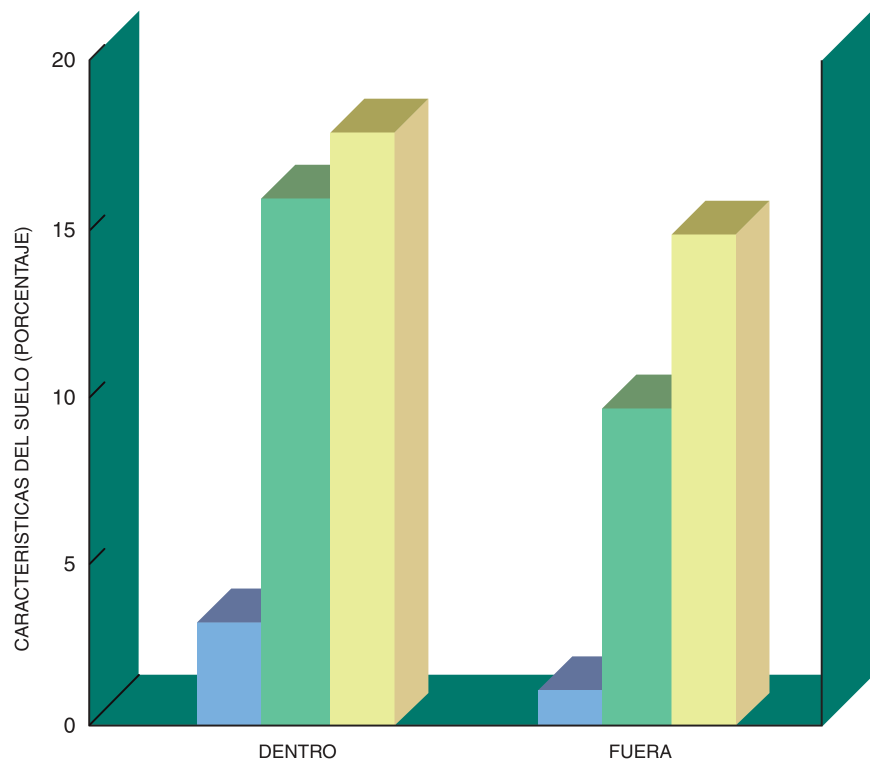
Con la concurrencia de *Ballota* y de otras especies bajo la copa de la retama crece la disponibilidad de agua por parte del arbusto. De ese modo la retama satisface buena parte de su demanda hídrica con agua del suelo, cuyo almacenamiento se favorece por la presencia de una densa cobertura. Por otra parte, la hojarasca caída promueve la descomposición de los cladodios secos y mejora el ciclo de los nutrientes.

Hace más de 40 años se advirtió ya que las interacciones entre plantas del desierto facilitaban el asentamiento de ciertas especies en ambientes tan hostiles. En el ejemplo del mutuo beneficio para *Retama* y *Ballota* podría esconderse una explicación. Ambas sacan partido de la “isla de fertilidad” que se desarrolla como consecuencia de su asociación, creando un sistema en el que la competencia por nutrientes y agua se ve compensada por los beneficios de crecer juntas.

Las interacciones positivas entre plantas superiores determinan la evolución del ecosistema, pues modifican las condiciones físicas y biológicas del entorno. Nuestro arbusto, sin hojas y fijador de nitrógeno atmosférico, desarrolla unas raíces profundas, que pueden absorber agua a más de 30 metros de profundidad. La copa filtra la radiación solar. La cuantía y el tiempo que la luz solar incide directamente sobre el suelo influyen en la temperatura que se alcanza, por lo que en los ecosistemas semiáridos, cuando el suelo expuesto al sol alcanza más de 60 ºC, bajo la copa la temperatura es mucho más moderada, permitiendo que en ese microclima prosperen numerosas herbáceas.

El manto protector de *Retama* extiende el rango de distribución de algunas especies y crea diferentes nichos ecológicos vinculados a los gradientes que se producen bajo la copa. La hojarasca, formada por cladodios secos y madera, se acumula en el centro y disminuye hacia el borde del arbusto. La capa que genera, además de proteger el suelo, da lugar a un gradiente de dificultad para el establecimiento de herbáceas, reduciendo hasta un tercio el número de especies que se encuentran en el centro respecto a las que se observan en el borde. Por su parte, la mineralización de la materia orgánica caída se acentúa en la zona intermedia; es decir, ni en el borde ni bajo la parte central de la copa. La diversidad de especies crece hacia la periferia, donde las semillas dispersadas por el viento quedan atrapadas por la hojarasca.

Los arbustos de *Retama* crean, pues, fuertes gradientes de luz, temperatura, humedad y fertilidad del suelo, permitiendo que un número elevado de especies herbáceas y arbustivas se instalen bajo su copa, dando lugar a una productividad y una diversidad muy superiores a las de las zonas adyacentes. Efectos similares se han observado en otros ecosistemas. Así, el límite superior que alcanzan las algas en la zona intermareal se ha-



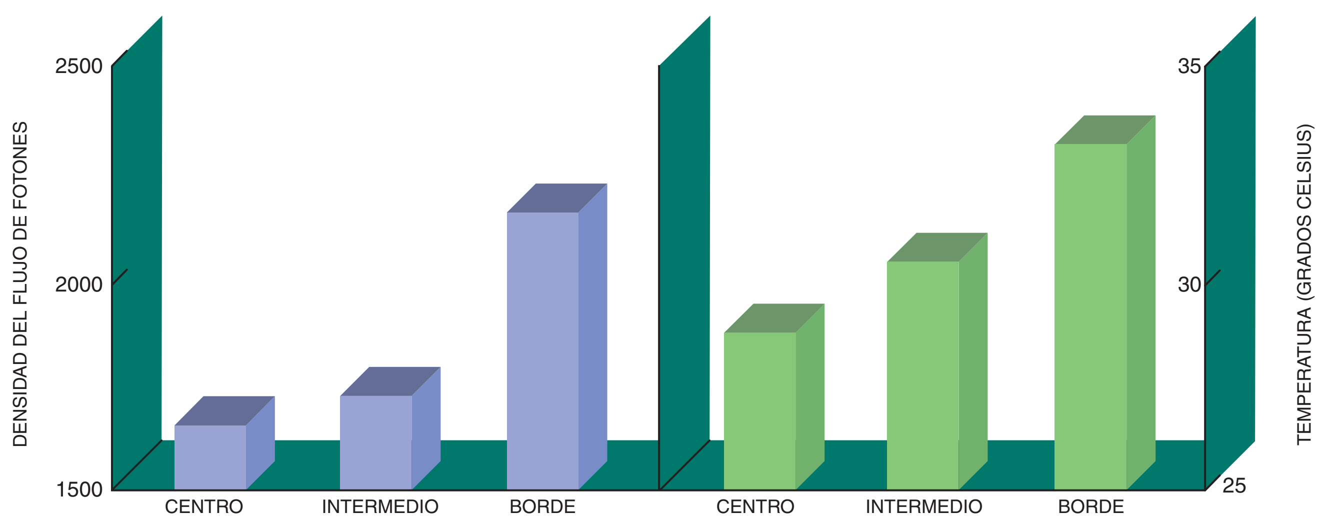
3. LOS SUELOS BAJO LAS COPAS de individuos maduros de *Retama* se caracterizan por una mejora significativa en muchos de sus parámetros fisico-químicos comparados con los existentes en los suelos de los claros, de características mucho más pobres y oligotróficas. En la figura se representa el porcentaje de materia orgánica (*azul*), de componentes finos, es decir limos y arcillas (*verde*), y el porcentaje de agua almacenada (*amarillo*) en el suelo, dentro y fuera de las copas de *Retama*.

lla propiciado por otros organismos que amortiguan las oscilaciones de humedad y temperatura.

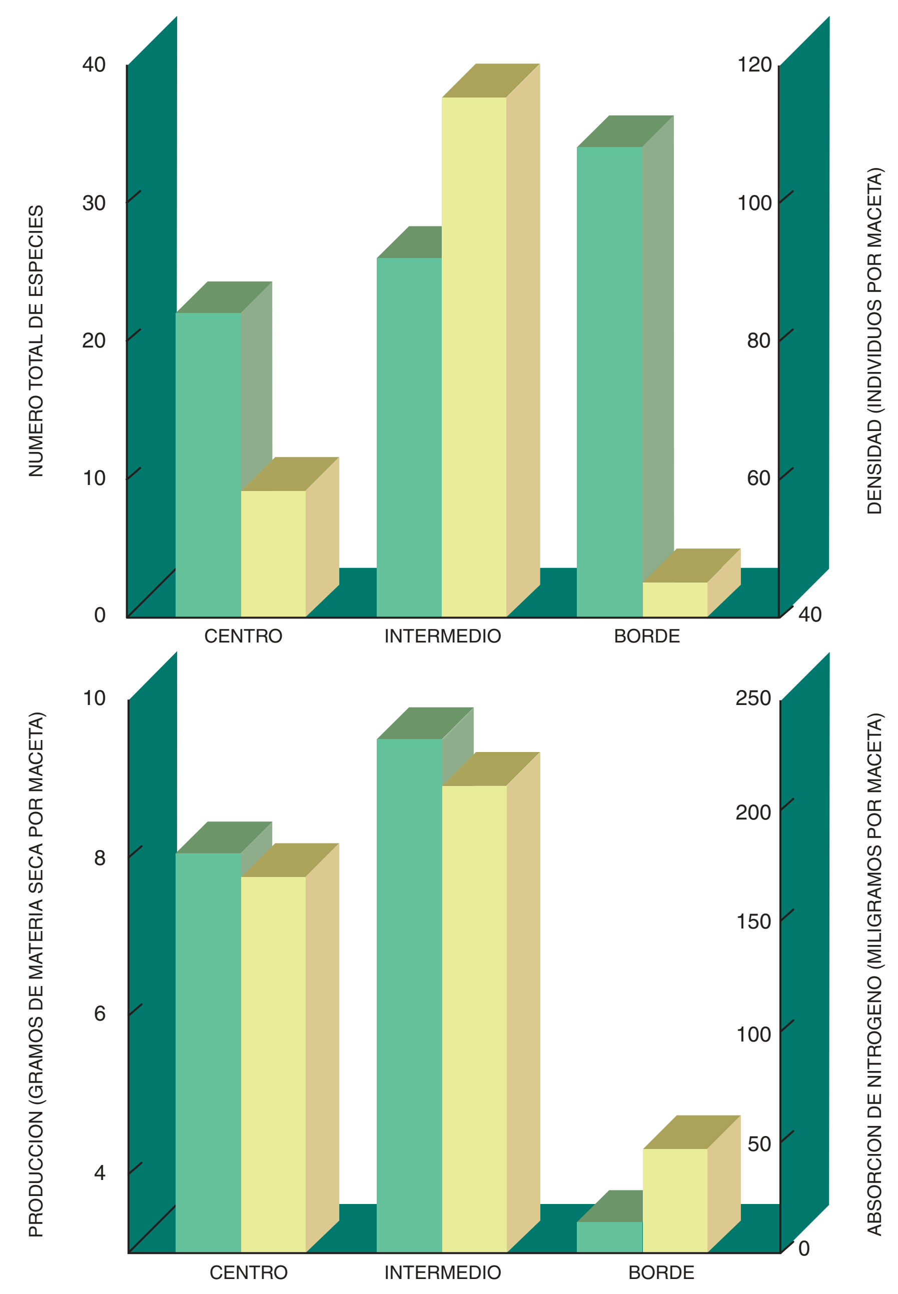
En los primeros decenios del siglo XX, Frederick E. Clements y otros ecólogos vieron en las interacciones positivas uno de los mecanismos de la sucesión, o sustitución de especies colonizadoras por otras que van llegando posteriormente. Pero en 1977, Joseph H. Connell y R. O. Slatyer postularon que la sucesión se fundaba sobre todo en la competencia interespecífica. El artículo donde exponían su tesis fue determinante para que la investigación se aplicara a la competencia, en detrimento de otras interacciones.

Bajo las copas de *Retama* nosotros hemos comprobado que se da un proceso similar al de la sucesión autogénica mediante un mecanismo de retroalimentación positiva. El número y tipo de especies que crecen bajo la copa varían con la edad del arbusto, al tiempo que lo hacen las características funcionales de la propia *Retama*. Así, por ejemplo, el peso y el área de cladodios por rama aumentan con la edad, lo mismo que el área de "hoja" por unidad de peso, un parámetro que refleja la fertilidad del medio. Las propiedades del suelo acompasan sus cambios a la edad del arbusto; ocurre, a modo de ejemplo, con la proporción de arcilla y limo, que aumentan significativamente con el tiempo. Bajo la copa se acumulan de 500 a 800 gramos de hojarasca por metro cuadrado, aunque en ocasiones puede superar el kilogramo; la tasa de descomposición es mayor bajo los arbustos añosos. Los sedimentos aumentan con la edad, a la par que crece la capacidad de almacenaje de agua y de nutrientes disponibles.

El número de especies y la biomasa al amparo de *Retama* dependen de la edad de la copa. La biomasa varía de unos 30 gramos por metro cuadrado en arbustos jóvenes hasta casi 100 gramos por metro cuadrado en los viejos. Este incremento se debe fundamentalmente a la presencia de plantas de cierto porte (*Artemisia barrelieri* y la misma *Ballota nigra*) o a gramíneas perennes, como *Piptatherum miliaceum*. Hasta 42 especies se han encontrado



4. LA RADIACION FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA, expresada en densidad de flujo de fotones (*gráfico de la izquierda*), se filtra de forma diferencial en función de la distancia al centro de las matas de *Retama*, lo que tiene importantes consecuencias en la temperatura que se alcanza bajo las matas. En un día de primavera, la temperatura media diurna en el borde de la copa es muy elevada, atenuándose hacia el centro (*gráfico de la derecha*) y mejorando las condiciones para el desarrollo de las plantas herbáceas.



5. CARACTERISTICAS DE LA COMUNIDAD de plantas anuales en suelos procedentes de tres posiciones bajo la copa de *Retama*. Arriba: número total de especies (*barras claras*) y número de individuos (*barra oscuras*). Abajo: biomasa producida (*barra clara*) y contenido en nitrógeno (*barra oscura*). Nótese que los valores más altos de todas las variables, a excepción del número de especies, se alcanzan en la posición intermedia bajo la copa.

asociadas a arbustos jóvenes, con una media de 17 especies por planta. Este número aumentó hasta 95 en los arbustos más viejos, con una media de 40 especies por arbusto.

Las especies que se encuentran frecuentemente bajo arbustos jóvenes son especies resistentes al estrés ambiental, de escaso porte y semillas pequeñas que, poco a poco, son expulsadas de la parte central de la copa por especies de mayor tamaño. La continuidad de este proceso en el tiempo explica que los arbustos viejos presenten una flora muy diferente, con una mayor proporción de plantas perennes de las que medran en los pies jóvenes.

La comunidad creada en torno a *Retama* muestra una fuerte tendencia a la sucesión. Primero se instalan las especies tolerantes al estrés, que darán paso, con la mejora de las condiciones ambientales, a especies menos resistentes. Y, en reciprocidad, conforme se enriquece el suelo para beneficio de herbáceas se refuerzan las características funcionales de los arbustos. Así, el número y el peso total de frutos producidos por cada planta de *Retama* aumentan proporcionalmente con la edad, igual que la inversión reproductora, que se mide en gramos de fruto por kilogramo de arbusto. Ahí reside, quizás, el núcleo funcional de las islas de fertilidad, que permiten una elevada productividad vegetal en zonas yermas o sometidas a altos niveles de estrés.

Tanto los efectos de *Retama* sobre su entorno como los casos descritos en diferentes lugares indican que algunos ecosistemas son más útiles que otros a la hora de poner en evidencia las relaciones entre especies por los efectos fuertes, directos y cuantificables que ejercen las plantas sobre el medio físico y por la escala relativamente pequeña a la que operan las interacciones entre suelo y planta.

Si se trabaja a una escala apropiada, se observa que la sucesión se basa en interacciones positivas. Mark Bertness y Ragan Callaway han propuesto que este tipo de interacción sería el adoptado en medios de intenso estrés físico y elevada presión de los herbívoros. La incorporación de las interacciones positivas en los modelos de organización de la comunidad incrementará nuestro conocimiento de la estructura y dinámica de las comunidades naturales y nos llevará a un mayor entendimiento de su estabilidad.

FRANCISCO I. PUGNAIRE y MARIA JOSE MORO han estudiado las relaciones entre el medio y la vegetación en condiciones de sequedad extremas. Pugnaire trabaja en la Estación Experimental de Zonas Áridas de Almería, y Moro en el departamento de ecología de la Universidad de Alicante.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FACILITATION AND SUCCESSION UNDER THE CANOPY OF THE LEGUMINOUS SHRUB, *RETAMA SPHAEROCARPA*, IN A SEMI-ARID ENVIRONMENT IN SOUTH-EAST SPAIN. F. I. Pugnaire, P. Haase, J. Puigdefábregas, M. Cueto, L. D. Incoll y S. C. Clark, en *Oikos*, vol. 75, págs. 455-464, 1996.

MECHANISMS OF INTERACTION BETWEEN *RETAMA SPHAEROCARPA* AND ITS UNDERSTORY LAYER IN A SEMI-ARID ENVIRONMENT. M. J. Moro, F. I. Pugnaire, P. Haase y J. Puigdefábregas, en *Ecography*, vol. 20, págs. 175-184, 1997.

Shawn Carlson

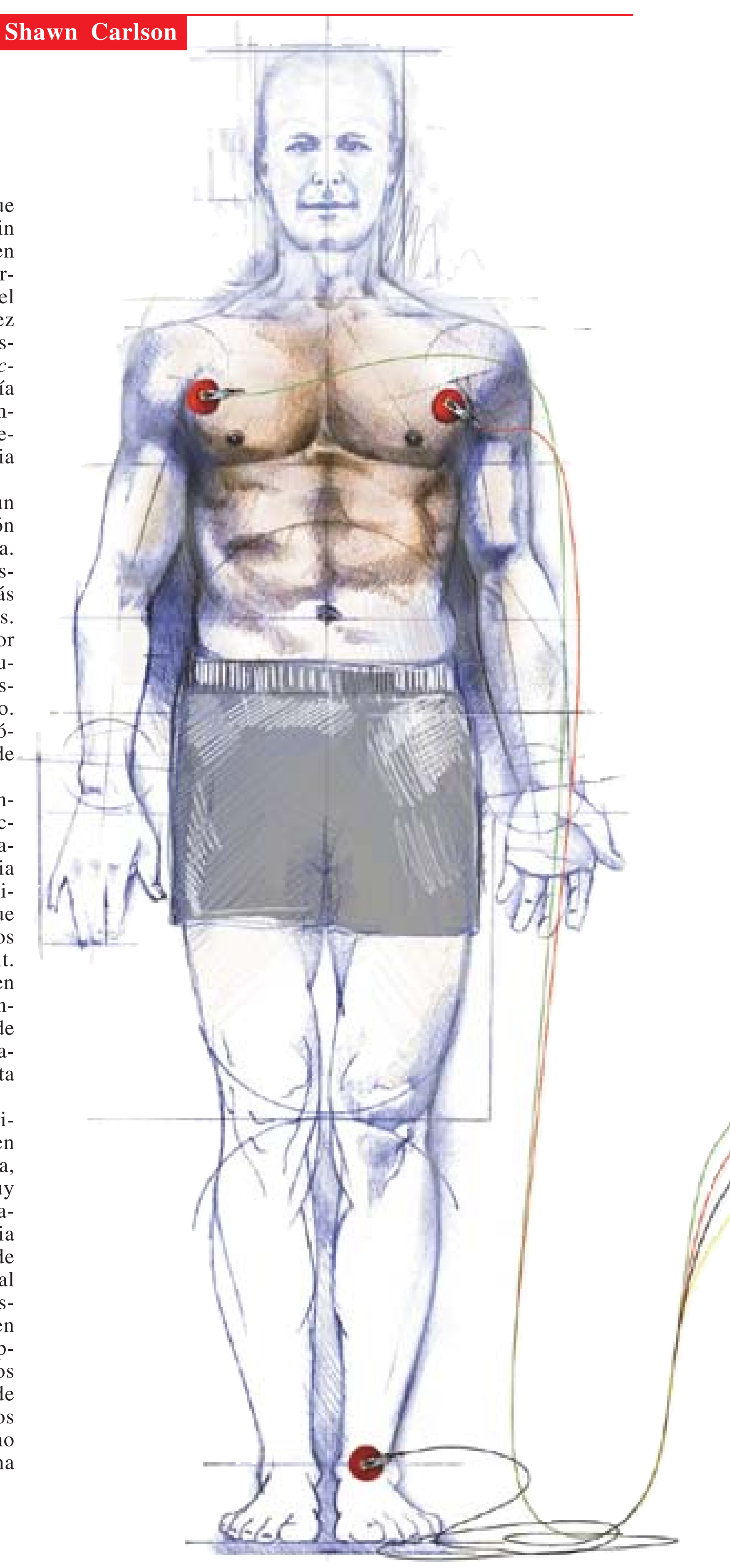
Uno es de donde late

Nunca pasé tanto miedo como el día en que creí que iba a perder a mi esposa. Sin resuello, me salté todos los semáforos en rojo camino del hospital, mientras Michele perdía rápidamente sus fuerzas en el asiento del acompañante. Todo había comenzado justo diez minutos antes, cuando confirmé con mi estetoscopio electrónico de factura casera (*véase la sección de diciembre de 1997*) que su corazón latía de forma irregular. En los momentos en que irrumpíamos en el estacionamiento del hospital, apenas podía hablar. Tuve que cargar con ella hacia la sala de urgencias.

Resultó tratarse de un efecto secundario de un esteroide que estaba tomando por prescripción médica. Seis horas después volvíamos a casa. Pero la experiencia me asustó tanto, que le construí un monitor cardíaco que nos avisase con más tiempo si alguna vez reaparecían los síntomas. Aquel monitor era acústico. Aunque un sensor como ése facilita la detección de ritmos irregulares, podemos extraer mayor información registrando la firma eléctrica del músculo cardíaco. Decidí mejorar las cosas con un electrocardiógrafo, o ECG, que puede construirse en una tarde sin excesivo dispendio.

El potente bombeo de nuestro corazón está impulsado por unas intensas ondas de actividad eléctrica, en el curso de la cual las fibras musculares se contraen y relajan siguiendo una secuencia orquestada. Las ondas provocan el paso de débiles corrientes por nuestro cuerpo, haciendo que la diferencia de potencial eléctrico entre distintos puntos de la piel sea del orden de un milivolt. Las señales pueden cambiar apreciablemente en sólo un quinceavo de segundo. Por ello, para amplificar esa señal hasta un nivel mensurable de un volt se requiere un amplificador con una ganancia de 1000 aproximadamente y una respuesta en frecuencia de al menos 50 hertz.

Que nadie se ilusione pensando en un amplificador operacional. La mayoría no nos sirven aquí por culpa de dos fastidiosas sutilezas. Primera, cuando colocamos dos electrodos en lugares muy separados de nuestra piel, ésta actúa a la manera de una tosca batería: genera una diferencia de potencial continuamente variable que puede superar los dos volt. En comparación, la señal cardíaca resulta insignificante. Aún peor, nuestro cuerpo y los cables del aparato se erigen en magníficas antenas de radio, que fácilmente captan el zumbido de 50 hertz que emana de todos los cables eléctricos de nuestro hogar. Ello añade una tensión senoidal que anega todavía más los diminutos impulsos de nuestro corazón. Y como esas oscilaciones se hallan tan cerca de la gama



de frecuencias necesaria para rastrear la acción de la víscera, es difícil eliminar por filtrado la señal indeseada.

Ambas dificultades generan iguales subidas de tensión en las dos entradas al amplificador. Por desgracia, los amplificadores operacionales no pueden rechazar esas señales. Si deseamos asegurarnos de que la entrada inservible "de modo común" (que, recordemos, puede ser 1000 veces mayor que nuestra señal) no añada un error superior al uno por ciento a la medición del voltaje, necesitaremos un índice de rechazo en modo común (CMRR, "Common Mode Rejection Ratio") de al menos 100.000 a uno (100 decibelios). Tal precisión deja fuera de nuestro interés a la mayoría de los amplificadores operacionales.

Cuando una aplicación reclama una ganancia alta y un CMRR de 80 dB o más, suele recurrirse a unos dispositivos especiales, los amplificadores de instrumentación. Ajustado para una ganancia de 1000, el AD624AD de Analog Devices ofrece un CMRR mayor que 110 dB. Los adictos al manipuleo pueden entretenerse experimentando con el AD620AN, una opción más barata.

El AD624AD nos permite una fácil monitorización del corazón. Para seleccionar una ganancia de 1000 hay que cortocircuitar ciertas patillas tal como se muestra en la figura. El filtro RC de dos etapas suprime las frecuencias superiores a unos 50 hertz. Para llevar al amplificador las señales de mi cuerpo me serví de un cable telefónico de cuatro conductores. Se necesitan sólo tres conductores. En el costado de mi caja tubular dispongo de un enchufe telefónico que facilita la conexión y la desconexión.

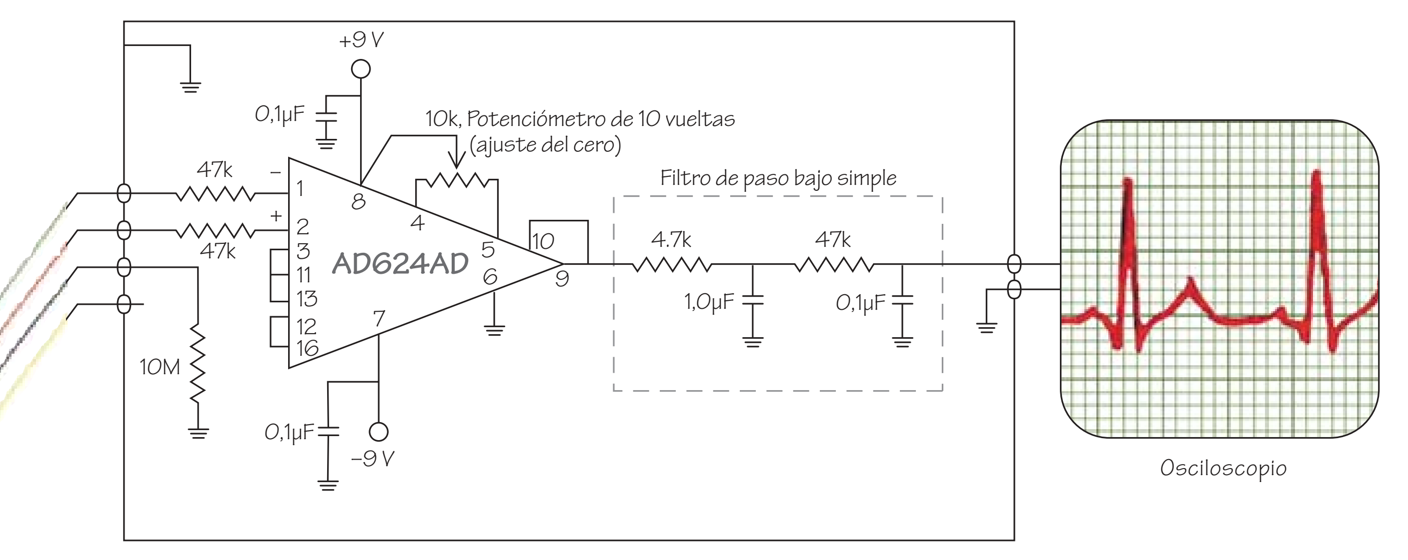
Mis primeros electrodos los hice con monedas (cuartos de dólar), untadas con una capa conductora de champú, que encinté fuertemente a mi cuerpo y conecté a los conductores. Funcionaron. Luego descubrí que cualquiera puede hacerse con paquetes de 50 electrodos de verdad, o sea, los mismos electrodos autoadhesivos que usan los cardiólogos. Los venden en los suministradores de material médico. Basta mondar y pegar. Rematé los conductores de señal con pinzas de cocodrilo para afianzar los pezones metálicos a los reversos de los electrodos.

El hilo negativo se conecta a la muñeca izquierda del sujeto, el positivo a la muñeca derecha y el de masa a la espinilla izquierda justo encima del tobillo. Me resultaba algo incómodo manejar el equipo con las muñecas cableadas; sujeté entonces los hilos derecho e izquierdo justo debajo de las axilas y pasé los conductores por debajo de mi ropa para sacarlos por la hebilla del cinturón.

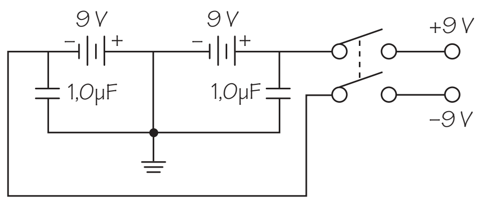
El despliegue de la traza electrocardiográfica en el osciloscopio es delicioso. El osciloscopio es esencial para todo aficionado a la electrónica. Todos deberían tenerlo. Los comercios de artículos de electrónica venden osciloscopios de dos canales con velocidades de barrido de 100 megahertz (muy superior a la necesaria para un proyecto tan sencillo como éste). A precios más económicos podrían hallarse en las ofertas o en los rastros para radioaficionados. Quienes tengan un presupuesto menos holgado, pueden construirse un monitor más barato; para sugerencias, consúltese la discusión de este proyecto en el sitio Web de la Society for Amateur Scientists.

Para digitalizar las trazas y estudiarlas en un ordenador, hace falta un convertidor analógico-digital capaz de muestrear a 100 hertz o más; o sea, por lo menos al doble de la frecuencia de la señal.

Para más información acerca de este y otros experimentos para aficionados, consúltese el sitio Web de la Society for Amateur Scientists en sas.org. Como servicio a la comunidad de aficionados, SAS proporciona sólo los componentes electrónicos, incluidos los electrodos (pero no la placa ni la caja) por 60 dólares. Se puede escribir a la sociedad al 4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA 92117, o llamar al 619-239.88.07.



El corazón del aparato es un circuito de filtro y amplificador. Amplifica las débiles tensiones eléctricas que se miden entre dos puntos distintos de la piel. Empleando un amplificador instrumental en vez de otro operacional, nos aseguramos una diferencia de voltaje exacta, aunque fluctúe el nivel de tensión absoluto. La salida puede observarse en un osciloscopio o en un monitor de factura casera.



Ian Stewart

Paradojas perdidas

Entre los problemas más incitantes de las matemáticas se cuentan los relativos a las paradojas lógicas. Las más profundas consisten en enunciados que entrañan una contradicción; de éstas, la más conocida es “Este enunciado es falso”. En el análisis de tales enunciados, se ha de poner el máximo cuidado al definir los términos. Ciertas paradojas subsisten incluso tras el análisis más minucioso; cuando así ocurre, iluminan las limitaciones del pensamiento lógico. Otras paradojas no resisten un examen estricto. Expondré aquí mis opiniones sobre algunas.

Protágoras fue un filósofo griego que enseñaba leyes en el siglo V a.C. Acordó con uno de sus discípulos que éste le pagaría sus lecciones cuando hubiera ganado su primer pleito. Pero el discípulo no consiguió clientes, y al final Protágoras le amenazó con querellarse. Protágoras razonó que, en cualquier caso, él ganaría. Pues si el tribunal fallase a su favor, el discípulo tendría que pagarle; si fallase en contra, el discípulo también tendría que pagar, pues acabaría de ganar su primer pleito. El razonamiento del discípulo fue justamente al contrario: si Protágoras vencía, según el acuerdo de ambos, aún no tendría que pagar, mientras que si Protágoras perdía, tampoco tendría que pagar, por así decretarlo el tribunal.

Aunque ameno, no me parece que este dilema resista un análisis atento. Ambos litigantes están mezclando conceptos: por una parte suponen que su convenio está en vigor, pero también suponen, al mismo tiempo, que el fallo del tribunal puede imponerse a él. Ahora bien, ¿por qué se llevan a los tribunales esta clase de asuntos? Porque es tarea del tribunal resolver las posibles ambigüedades del contrato y, en caso necesario, imponer su decisión. Así pues, si el tribunal falla en favor de Protágoras, el estudiante tiene que indemnizarle, mientras que si lo hace a favor del estudiante, éste no tendría por qué. Esta paradoja, bajo la dura luz de la lógica, parece derretirse, y por eso la tomo como ejemplo de Paradoja Perdida.

Tomemos ahora una paradoja más interesante, ideada por Jules Antoine Richard. En nuestro idioma, ciertas frases definen números enteros positivos; otras, no. Por ejemplo, “El año del descubrimiento de América” define al número 1492, mientras que “La trascendencia histórica del descubrimiento de América” no define un número. Examinemos ahora la frase “El mínimo número que no puede ser definido en nuestro idioma con una frase de menos de 20 palabras”. Observemos que cualquiera que fuera tal número, lo acabaríamos de definir con una frase que sólo contiene 19 palabras. ¡Vaya!

¿Qué está ocurriendo? La única forma evidente de escapar del dilema sería que la frase en cuestión no definiera, en realidad, un número. En tal caso, desaparecería la paradoja, pues el enunciado ya no entraría en contradicción consigo mismo. Será necesario determinar si este número hipotético —el número mínimo que no puede ser definido con una frase corta— existe.

Si aceptamos que nuestro idioma contiene un número finito de palabras, el número de frases que tienen menos de 20 también será finito. Por ejemplo, admitiendo que haya 99.999 palabras, habrá a lo sumo 100.000^{19} que tengan 19 palabras o menos. (Para

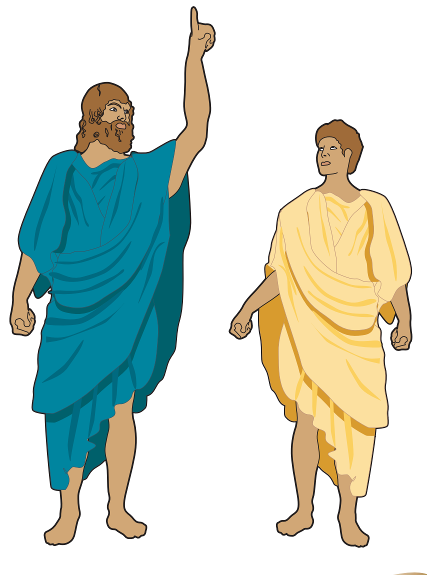
LA PARADOJA DE PROTAGORAS

PROBLEMA:

Protágoras, filósofo de la Grecia clásica, enseña leyes a un discípulo, quien habrá de pagarle en cuanto gane el primer pleito. El discípulo no tiene clientes y Protágoras le demanda.

PARADOJA:

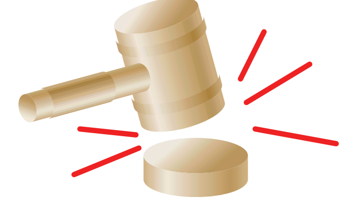
Protágoras cree que no puede dejar de ganar, porque:
• Si el tribunal falla a su favor, el discípulo tendrá que pagarle.
• Si el tribunal falla en contra, el discípulo habrá ganado su primer pleito, y también tendrá que pagarle.



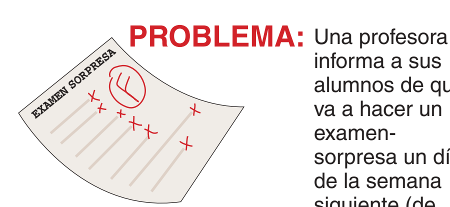
El discípulo cree que no puede dejar de ganar, porque:
• Si el tribunal falla a su favor, no tendrá que pagar las enseñanzas.
• Si el tribunal falla en favor de Protágoras, no tendrá que pagar, porque todavía no habrá ganado su primer pleito.

SOLUCION:

Los tribunales existen para imponer sus resoluciones en caso necesario. Así pues, las segundas partes de los razonamientos de Protágoras y su discípulo no son válidas.



LA PARADOJA DEL EXAMEN-SORPRESA



PROBLEMA: Una profesora informa a sus alumnos de que va a hacer un examen-sorpresa un día de la semana siguiente (de lunes a viernes).

PARADOJA:



Los estudiantes razonan que si el jueves todavía no se hubiera hecho el examen, tendría que ser el viernes. Por tanto, no sería un examen-sorpresa.



Como el examen no puede ser el viernes, si el miércoles todavía no se hubiera hecho el examen, tendría que hacerse el jueves. Pero entonces tampoco habría sorpresa.



Por el mismo razonamiento, los estudiantes pueden descartar también el miércoles, el martes y el lunes. El examen-sorpresa es imposible.

SOLUCION:

LUNES	MARTES	MIERCOLES
Los estudiantes: "El examen será hoy."	Los estudiantes: "El examen será hoy."	Los estudiantes: "El examen será hoy." La profesora: "¡Habéis acertado!"

El razonamiento de los estudiantes es lógicamente equivalente al acto de anunciar cada mañana. "El examen será hoy." Como cada día esperan que sea el del examen, es evidente que no habrá sorpresa.

incluir en el total las frases más breves, suponemos que en la frase caben palabras en blanco; por eso la base es 100.000, en lugar de 99.999.) Muchas de esas frases no tienen sentido y muchas de las que sí lo tienen no definen enteros positivos, pero eso sólo significa que son menos las frases a considerar. Entre ellas, definen un conjunto finito de enteros positivos; un teorema clásico de las matemáticas afirma que en tales circunstancias existe un único número entero positivo mínimo que no pertenece al conjunto. Así pues, a primera vista, la frase de 19 palabras de Richard tiene que definir un entero positivo.

Y sin embargo, no puede hacerlo. Se podría argumentar que otra frase, "Un número que multiplicado por cero da producto cero", nos desprendería del anzuelo lógico, porque define a la totalidad de los enteros positivos, y no deja para la frase de Richard nada que definir. Pero si una frase es ambigua, no podemos admitirla como definición, porque una definición exige, precisamente, univocidad. ¿Es ambigua, entonces, la frase de Richard? En realidad, no. Define un número unívocamente: no puede haber dos números mínimos que satisfagan sus condiciones. Observemos que si hubiéramos considerado, en cambio, la frase "El mínimo número que no puede ser definido en nuestro idioma con una frase de menos de 19 palabras" no habría problema. La paradoja de Richard nos dice algo sumamente profundo sobre las limitaciones del lenguaje como descripción de la aritmética. Como el problema sigue siendo inescrutable, diré que es un ejemplo de Paradoja Reconquistada.

En vena más recreativa, tenemos la paradoja del "examen sorpresa". Una profesora les dice a sus alumnos que va a hacer un "examen-sorpresa" un día de la semana siguiente (de lunes a viernes). Se reserva el día, y los estudiantes no tienen forma de adivinarlo. Los estudiantes, sin embargo, razonan como sigue: si el examen estuviera programado para el viernes, al terminar las clases del jueves sabríamos que el examen ha de realizarse al día siguiente, y no habría sorpresa. Por tanto, podemos descartar que el examen-sorpresa sea el viernes. Pero ahora tenemos el mismo problema con una semana de cuatro días (de lunes a jueves). Si el examen no ha tenido lugar el miércoles, sabríamos que tenía que estar previsto para el jueves, pues si no, no podría ser un examen-sorpresa. Así que podemos también descartar el jueves. Y por el mismo razonamiento, podemos eliminar el miércoles, el martes y el lunes. Llegamos a la conclusión de que un examen-sorpresa no es posible.

Por otra parte, si la profesora fija el examen para el miércoles, no parece haber forma de que los estudiantes lo sepan de antemano. Así que hay algo de escurridizo en todo el razonamiento. ¿Tenemos otro caso de Paradoja Perdida o de Paradoja Reconquistada?

Aunque el ejemplo parece una paradoja, no lo es. Consideremos una reformulación del problema, lógicamente equivalente. Supongamos que cada mañana los estudiantes anuncian, "El examen será hoy". Al cabo lo harán en el día del examen, momento en que podrán afirmar que el examen no fue sorpresa. En esta variante hay trampa: es verdadera, pero trivial. Si uno espera cada día que se produzca la sorpresa, es evidente que no la habrá. Mi opinión es que la paradoja del Examen-Sorpresa entraña la misma obviedad, aunque disfrazada para que parezca misteriosa. La falacia es menos obvia porque todo es imaginado en lugar de efectuado.

Y estoy aquí sugiriendo dos cosas. La menos interesante es que esta paradoja depende de lo que se entienda por "sorpresa". La más interesante es que, cualquiera que sea el significado razonable que le atribuyamos, hay dos formas lógicamente equivalentes de enunciar la estrategia de predicción de los estudiantes. Una es la del planteamiento habitual del problema, que parece indicar una paradoja genuina. La otra, que presenta el problema desde la perspectiva de actos reales en lugar de situaciones hipotéticas, lo convierte en algo correcto pero sin interés, destruyendo el aspecto paradójico.

Para ilustrar mi punto de vista, añadiré otra condición a la paradoja del Examen-Sorpresa. Supongamos que los alumnos tienen mala memoria, y que lo que estudian una tarde para preparar el examen ha quedado olvidado ya en la tarde siguiente. Si, como los estudiantes afirman, el examen no va a ser una sorpresa, deberían esperar hasta la tarde anterior al examen para prepararlo. Pero si no estudian el domingo por la tarde y el examen es el lunes, lo harán mal. Lo mismo vale para las tardes del lunes al jueves. Así que, a pesar de no verse nunca sorprendidos por el examen, los estudiantes tendrán que repasar cinco tardes seguidas.

Paradoja perdida, diría yo.

Glenn Zorpette

Astronave monoplaza

Que los paseantes del espacio muestren una asombrosa serenidad flotando a 500 kilómetros de la Tierra da fe de cuán eficazmente les protegen sus trajes espaciales de doce millones de dólares. Esa indumentaria es lo único que les separa del más hostil de los entornos conocidos. Cual diminutas astronaves, los trajes disponen de oxígeno, comunicaciones y protección frente a temperaturas extremas, radiaciones cósmicas y ultravioletas y micrometeoritos.

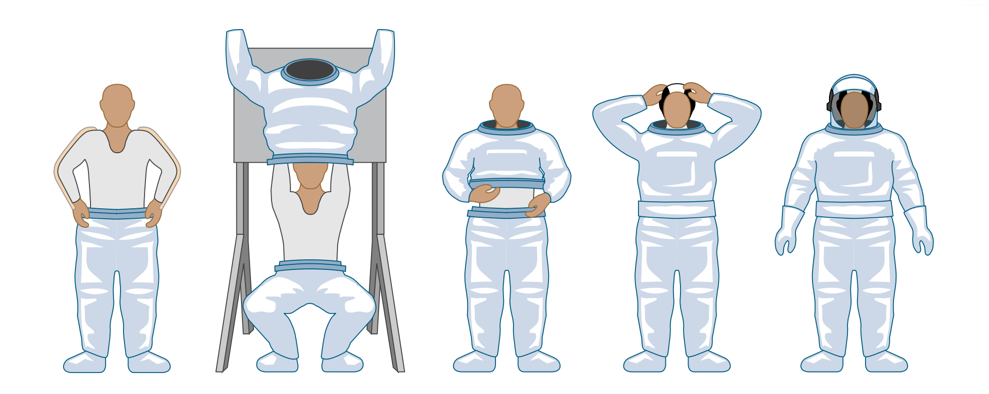
El "sistema mantenedor de vida primario", que porta a la espalda, contiene el corazón de un sistema atmosférico. Recicla el aliento, eliminando el dióxido de carbono y añadiendo oxígeno en la medida precisa. Dentro del traje, el medio ambiente estándar es de sólo 0,29 atmósferas de oxígeno puro y tan escasa presión cumple una doble misión. Primera, mejora considerablemente la libertad de movimientos en el vacío casi absoluto del espacio. Segunda, rebaja los esfuerzos mecánicos globales sobre el traje. Pero a causa de la baja presión, los astronautas deben "preaspirar" oxígeno puro antes de ponerse el traje. Esa preaspiración reduce la cantidad de nitrógeno disuelto en sus tejidos orgánicos y les permite eludir un episodio de aeroembolismo cuando pasan de la lanzadera a la presión más baja del interior del traje.

Una bolsa con casi un litro de agua potable que llevan en el torso superior les permite beber a través de una boquilla situada en la escafandra. Para la recogida de orina portan un pañal de adultos modificado. Los trajes, de nombre oficial unidades de movilidad extravehicular, se construyen bajo la supervisión de la compañía Hamilton Sundstrand, contratista principal, con la colaboración de otras 52 empresas.

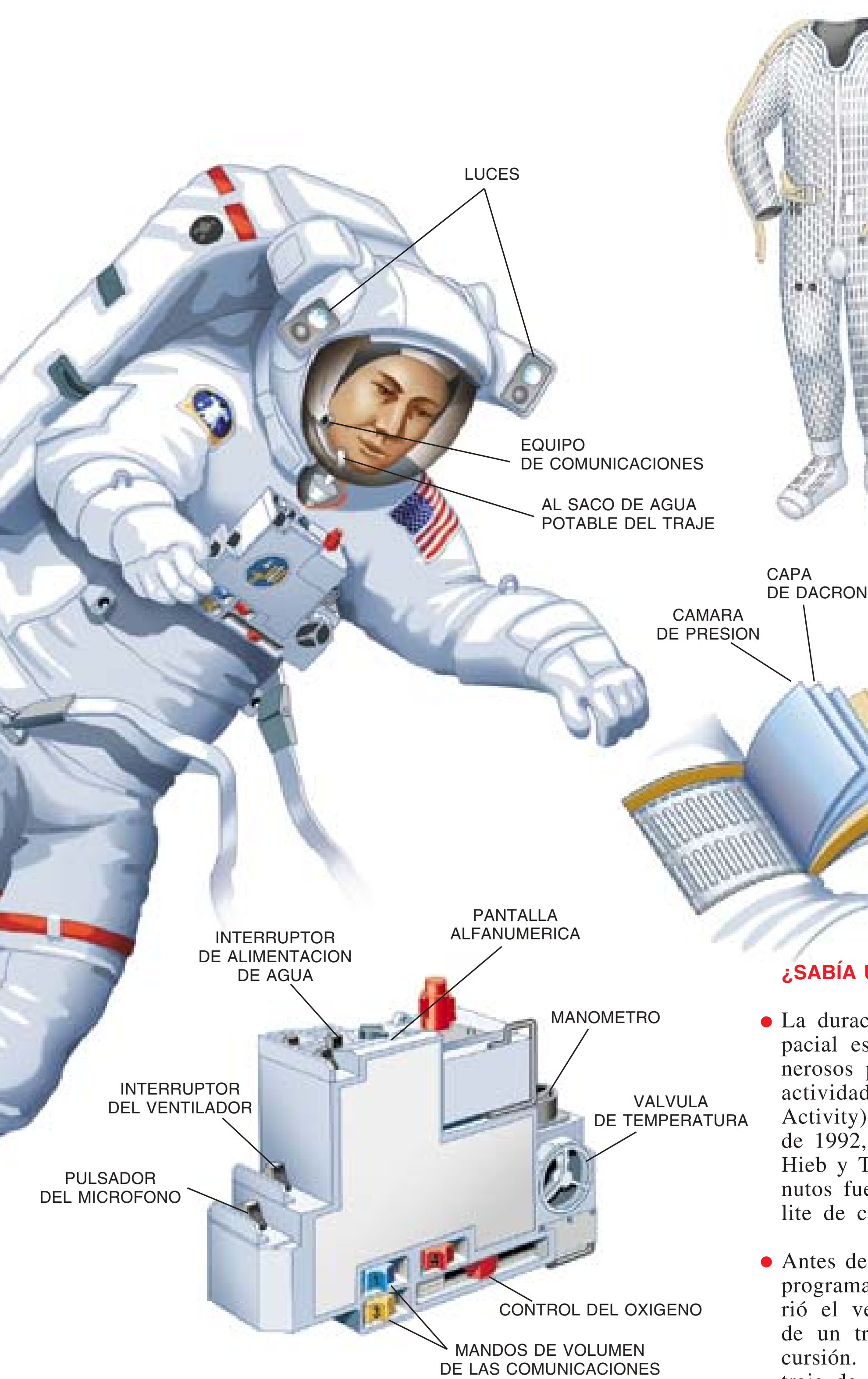
—Glenn Zorpette, de la redacción

RADIO
SISTEMA DE ALARMA
SUBLIMADOR
VENTILADOR CON MOTOR (INSUFLA OXIGENO A LA ESCAFANDRA)
BOTELLA DE OXIGENO PRINCIPAL
CARTUCHO DE HIDROXIDO DE LITIO
BATERIA
DEPOSITO DE AGUA
BOTELLA DE OXIGENO PRINCIPAL
REGULADOR DEL OXIGENO
BOTELLAS DE OXIGENO AUXILIARES

1. EL SISTEMA MANTENEDOR DE VIDA (*arriba*) emplea un ventilador para insuflar oxígeno a la escafandra y expulsar el aliento hacia los cartuchos de hidróxido de litio y carbón vegetal, que eliminan el dióxido de carbono y los olores. El regulador de oxígeno percibe las disminuciones de presión y añade el oxígeno necesario procedente de las botellas instaladas en los costados de la mochila. (Dos botellas de oxígeno auxiliares pueden proporcionar oxígeno durante una hora en caso de emergencia.) El sublimador retira el vapor de agua y enfría el aire hasta los 13 grados Celsius. Asimismo, elimina el calor del agua refrigerante que circula por la prenda interior de ventilación enfriada por líquido que el astronauta viste bajo el traje.



4. PARA VESTIRSE se empieza por los pantalones ("conjunto torso inferior") con las botas ya sujetas. Luego, se introduce en el "torso superior duro", dispuesto en un bastidor. Ya dentro de los indumentos, se tira hacia arriba de la pieza inferior y se une a la superior. Se cubre luego con el bonete "Snoopy", que contiene los auriculares y el micrófono de comunicaciones. Tras calzarse los guantes, se embute en la escafandra.



2. LA PRENDA DE VENTILACION ENFRIADA POR LIQUIDO (*izquierda*) se asemeja a un mono de punto con spandex. Su función principal es preservar el confort del astronauta en un entorno cuya temperatura puede oscilar desde los 120 grados C, bajo luz solar directa, hasta los –150 grados C a la sombra. Unos 90 metros de tubo de plástico recorren el traje; el agua que fluye por ese tubo es enfriada por el sublimador en el grado necesario para el confort del astronauta.

3. EL MATERIAL DEL TRAJE ESPACIAL (*izquierda*) está constituido por una cámara de presión hecha de nailon revestido con uretano, y contenida por una capa de Dacrón, para mantener el oxígeno dentro del traje. Las capas externas, que preservan el calor y protegen contra los micrometeoritos, incluyen varias de Mylar aluminizado, como aislante térmico, y una funda externa de Teflon, Kevlar y Nomex.

5. EL MODULO DE INDICACION Y MANDOS (*arriba*) permite al astronauta alterar el caudal del agua refrigerante que fluye por el traje y controlar los sistemas de comunicaciones, los ventiladores y el modo de respiración del regulador del oxígeno. Este módulo está también conectado a un sistema de alarma que hay en la mochila del mantenedor de vida y que le permite ejecutar un programa de diagnóstico para comprobar diversos subsistemas. Los resultados de los diagnósticos se presentan en la pantalla alfanumérica principal del módulo. Un indicador analógico independiente muestra la presión en el traje.

¿SABÍA UD. QUE... ?

- La duración máxima especificada de un paseo espacial es de siete horas, pero unos márgenes generosos permiten unas excursiones más largas. La actividad extravehicular (EVA, Extra Vehicular Activity) se prolongó como nunca el 13 de mayo de 1992, cuando los tripulantes Pierre Thuot, Rick Hieb y Tom Akers estuvieron ocho horas y 29 minutos fuera de la lanzadera trabajando en un satélite de comunicaciones Intelsat.

- Antes del primer paseo espacial desde la lanzadera, programado para la primera misión en 1982, se averió el ventilador del sistema mantenedor de vida de un traje espacial y hubo que cancelar la excursión. Fue el único problema importante con un traje de lanzadera en órbita.

- Los astronautas que trabajen en la Estación Espacial Internacional dispondrán de un accesorio, el SAFER (Ayuda Simplificada para Rescate en Actividades Extravehiculares), que les permitirá autopropulsarse hasta quedar fuera de peligro si algún contratiempo les deja a la deriva. Durante la construcción, la lanzadera permanecerá atracada en la estación, lo que dificultaría un rescate a tiempo. El dispositivo, que emplea nitrógeno como propulsor, se sujeta al fondo de la mochila del mantenedor de vida.

NEXOS

James Burke

Sucedió en el mar

No hace mucho, cruzaba el Atlántico de la manera más sibarita, a borde del egregio *Queen Elizabeth II* (conste que para una filmación, no por mero placer). En uno de los muchos y cómodos bares de que dispone, decidí darme un aire marinero y pedí un ron.

Recordé que, a principios del siglo XVIII, un inmigrante prusiano de nombre Thones Kunders fue de los primeros en llevar ron y melaza a Filadelfia. Debió su afición al negocio (y a otras cosas) a una conversación oída por casualidad a un par de piratas con pinta de malos. Algo relacionado con patas de palo, barcos varados y tesoros enterrados. Para su fortuna, no era un tesoro cualquiera, sino el tesoro legendario (todavía oculto) que escondiera Edward Teach, alias Barbanegra. Kunders fue en su busca, lo desenterró y en menos de lo que se tarda en cantar "ron, ron, ron, la botella del ron" se embarcó en el negocio de la importación-exportación, con una pequeña flota mercante. No se puede decir que le fuera mal. Peor le anduvo al propio Barbanegra, pirata que fue de los primeros y más temidos por los españoles. Nada ni nadie escapó a sus desmanes (abordajes, saqueos y torturas) por el Caribe, Virginia y ambas Carolinas. La ventura se le torció. Al poco fue capturado y decapitado.

Debió arrepentirse pronto de rechazar un tanto irreflexivamente la amnistía ofrecida por Woodes Rogers, gobernador de las Bahamas. Quien, por cierto, había alquilado las islas a sus dueños, con la verdadera fortuna que le había reportado un contrato de semi-piratería. Este acuerdo firmado con ciertos comerciantes ingleses disponía que navegara y saqueara toda nave española que transportara algo de valor por el Pacífico. (Accidentalmente, conocemos a un miembro no tan semi-pirata de su tripulación, el bucanero William Dampier, por su nexo con el Colegio Universitario William and Mary. Para ahorrar rubores a la academia obviaremos explicar de nuevo la naturaleza de esa relación.) En enero de 1709, en uno de sus paseos por el Pacífico, Rogers se dejó caer por Juan Fernández, una isla deshabitada frente a la costa chilena. El bote que envió a tierra regresó con un tipo medio loco vestido con piel de cabra y que apenas podía hablar ya inglés. Lo había abandonado allí, cuatro años antes, un barco en el que también viajaba William Dampier, quien abogaba ahora por reclutarlo (me extrañaría que se tratara de una asombrosa coincidencia).

Al año siguiente, de regreso a Londres, el nuevo marinero, Alejandro Selkirk, bajó a tierra con un botín suficiente para llevar una vida no documentada, salvo por la mención que Rogers hizo de él en su popular diario. Por él conocen los lectores a Selkirk bajo otro nombre, Robinson Crusoe, héroe de lo que es discutiblemente la primera novela inglesa, y obra de un autor que había leído el diario de Rogers: Daniel Defoe. Arruinado, escritor satírico, editor de revistas, panfletista, articulista político que ganó enemistados a ambos lados de su posición, vendedor de medias, azote de los engreídos, en resumen, un buen tipo que fue tantas cosas, que acabaríamos antes enumerando las que no fue. Robert Harley, que dirigía los destinos de Inglaterra por aquel entonces, lo contrató como agente de inteligencia, para informar de las artimañas escocesas en el momento de su unión, en 1707, con Inglaterra. Cumplió tan brillantemente su tarea, que ese Harley usó el semanario político de Defoe, *The Review*, para controlar las relaciones públicas del gobierno.

Harley también concibió una estafa redomada. Canceló gran parte de la deuda nacional (ingente y en incremento por la guerra contra Francia) con un enorme préstamo de la bolsa de valores. Este juego de espejos financiero fue objeto de estudio en el siglo XVIII cuando los funcionarios de hacienda se aplicaron y un galés, de nombre Richard Price, publicó un grueso tomo en el que se describía lo necesario para establecer un fondo para pagar deudas al servicio de la deuda. No domino el tema y es todo lo que puedo decir. El libro de Price hizo la vida más fácil para las viudas al ofrecer mayor fundamento que el tanteo al negocio de los seguros de vida, con un sólido estudio basado en registros parroquiales de nacimientos y defunciones. Price desarrolló lo que los aseguradores necesitaban para garantizar su solvencia: tablas de vida que permitieran establecer primas a partir de una estimación más realista de la esperanza de vida. Si van a vivir mucho, bájales el precio, proponía Price. Las cuotas bajaron y los ingresos aumentaron. Price se hizo muy popular en los círculos financieros. Otra obra suya (una enardecida apología de los rebeldes norteamericanos) le reportó una oferta como asesor financiero del Congreso de los EE.UU. (que rechazó) y otra para recibir un doctorado por Yale

junto con George Washington (que sí aceptó).

Price fue también invitado por Mrs Elizabeth Montagu, anfitriona de los superlativos en el Londres de la época. Sus tertulias, a las que asistían todos los que eran alguien, despertaban la envidia de las clases ociosas. Hasta las mujeres participaban y las que lo hacían formaban una especie de club dentro de un club y llevaban las medias azules. Entre las damas brillaba Hannah More, más conocida por sus diatribas radicales, que por promover las primeras escuelas dominicales. En ellas enseñó a los niños pobres a leer, pero no a escribir, nos entendemos, ¿verdad? Hannah abarcó temas dispares como la piedad, la educación de las mujeres, la superación personal o la esclavitud (a la que se oponía). Uno de sus héroes fue Granville Sharp, que invirtió la mayor parte de su vida y su fortuna en asuntos "liberales": la independencia de Norteamérica (a favor), cuadrillas de matones a sueldo (en contra), conversión de los judíos (a favor), algo arcano y relacionado con la gramática griega y la Biblia, y, sobre todo, la abolición de la esclavitud.

Años antes, en 1772, defendió el caso de James Somersett, un esclavo huido, y dio con su famoso dictado: "En cuanto un esclavo pisa territorio inglés queda libre." Resultado del mismo, en 1787 el número de esclavos liberados en Inglaterra comenzaba a ser embarazoso. Así que Sharp se sacó de la manga la Compañía de Sierra Leona. Ese mismo año, un primer cargamento de cuatrocientos esclavos liberados partió para Africa, estableciéndose en lo que acabaría llamándose Freetown.

La noticia corrió como la pólvora. Cinco años más tarde Freetown recibió nuevos huidos, esta vez desde Halifax, Nueva Escocia, a donde habían escapado al final de la Guerra de Independencia, hostigados por revolucionarios americanos poco impresionados por el apoyo que habían prestado los legalistas negros a los ingleses. Otros probritánicos fueron asimismo invitados a abandonar los nuevos Estados Unidos. Entre ellos un tipo al que se confiscó la flota mercante de la familia y que tuvo que marchar al norte, a Halifax, para empezar de nuevo.

Le fue bastante bien gracias al incremento de la navegación por el Atlántico (entre otras rutas la que ponía rumbo a Sierra Leona). Cuando se consiguió una paz duradera entre Inglaterra y los Estados Unidos y se empezó a necesitar un correo regular, allí estaba él. A mediados de siglo XIX la compañía que fundara era la más importante y siguió creciendo hasta convertirse en la equipada con los mayores transatlánticos. Uno de ellos resultaría ser el *Queen Elizabeth II*, orgullo de la familia.

Por una de esas ironías que hacen la historia tan divertida, el nombre de este grupo naval no resultó el mismo con el que comenzara. Un fenómeno frecuente con los emigrantes llegados a América, el apellido era mal deletreado por el funcionario de turno. Que escribió Cunard por el prusiano Kunders.

El código

y su cifra

ILLUMINATING LIFE. SELECTED PAPERS FROM COLD SPRING HARBOR (1903-1969). Preparado por Jan Witkowski. Cold Spring Harbor Laboratory Press; 2000. **TOBACCO MOSAIC VIRUS. ONE HUNDRED YEARS OF CONTRIBUTIONS TO VIROLOGY.** Dirigido por Karen-Beth G. Scholthof, John G. Shaw y Milton Zaitlin. APS Press; St. Paul, 1999.

I WISH I'D MADE YOU ANGRY EARLIER, por Max Perutz. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Nueva York, 1998. **RAMACHANDRAN. A BIOGRAPHY OF THE FAMOUS INDIAN BIOPHYSICIST,** por Raghupathy Sarma. Adenine Press; Nueva York, 1998.

WHO WROTE THE BOOK OF LIFE? A HISTORY OF THE GENETIC CODE, por Lily E. Kay. Stanford University Press; Stanford, 2000.

EVOLUTIONARY GENETICS. FROM MOLECULES TO MORPHOLOGY. Dirigido por Rama S. Singh y Costas B. Krimbas. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **GENETICS AND THE EXTINCTION OF SPECIES.** Dirigido por Laura F. Landweber y Andrew P. Dobson; Princeton University Press; Princeton, 1999.

Del redescubrimiento de las leyes de Gregor Mendel, por Hugo de Vries, Erich Tschermak y Karl Correns, a la secuenciación del ADN del genoma humano presentada en junio, por los grupos de Francis Collins y Craig Venter, ha pasado un siglo. El siglo de la genética. Cierto es que nos hallamos ante un primer borrador de la secuenciación, incompleta por definición, de nuestra dotación genética y nos espera el camino áspero que conduce a la identificación de los genes y de la misión que cumplen. Mas para hacernos cabal idea de la situación actual, para entenderla, conviene conocer de dónde se partió. Con detalle y perspectiva dispar se explica en los libros de cabecera.

La herencia constituye uno de los procesos distintivos de la vida. En los gametos portan los organismos instrucciones para formar otro individuo de su propia especie. La historia de la filosofía y de la ciencia abunda, desde su amanecer, en reflexiones sobre el origen de tales instrucciones. Pero hubo que esperar a la última centuria para que se abrieran las primeras compuertas de una cascada imponente de descubrimientos: las instrucciones de la herencia seguían reglas específicas de transmisión, residían en los cromosomas del núcleo, se materializaban en las moléculas de ADN, estaban escritas en un código y podían leerse para determinar la estructura y función del organismo.

En una Europa que acababa de sufrir grandes hambrunas, la presión sobre la agricultura instó el desarrollo de la mejora vegetal y animal, todavía basadas en el método de ensayo y error. Las autoridades de Brünn, en Moravia, organizaron sociedades para promover la investigación. Citaban nada menos que los ejemplos de Copérnico y Newton para expresar la deuda que la humanidad tendría algún día con la ciudad. C. F. Napp, director de la Sociedad Pomológica y Enológica de Brünn, y el abad del monasterio agustino pusieron su esperanza en la preparación de los religiosos jóvenes. Mendel, que había estudiado física en Viena, era uno de ellos. Y su “revolución científica”: aplicar un enfoque cuantitativo y extraer una explicación mecanicista de las leyes de la herencia.

Propuso que la información de la herencia pasaba de progenitores a descendientes en entidades discretas. El distinto color de la flor o la forma dispar de la simiente debíanse a caracteres diferentes (“factores” los llamó). Además, éstos se presentaban en pares, un miembro heredado del progenitor masculino y otro del femenino. Del par, uno podía dominar sobre el otro, que no desaparecía, sino que, persistiendo latente, podía reaparecer en generaciones posteriores y en proporciones predecibles. El trabajo, publicado en 1865, pasó inadvertido, por varias razones. A la archicitada obscuridad de la revista en que escribió (un boletín local) debiera añadirse el cariz matemático de sus formalismos y la naturaleza abstracta de los factores.

Pasados unos veinte años, los biólogos empezaron a buscar el constitutivo material de la herencia en el núcleo de la célula. Se había revelado por microscopía que los óvulos recién fecundados portaban dos “pronúcleos” de igual tamaño, uno procedente del espermatozoide paterno y otro del óvulo materno, que terminaban por fusionarse. En el núcleo destacaban los cromosomas, cuya investigación habían facilitado nuevas técnicas de tinción. Los cromosomas se duplicaban en cada ciclo de desarrollo y división celular. ¿Habría alguna relación entre cromosomas y herencia? ¿Contenía cada cromosoma todas las instrucciones de la transmisión hereditaria?

Sutton estableció en 1903 las bases cromosómicas de la herencia. De la fusión de la genética mendeliana y la citología nació la citogenética. Pero la conexión entre genes y cromosomas no se evidenció ahora en las plantas, sino en la mosca del vinagre. Alfred Sturtevant, doctorando en el laboratorio de Thomas Hunt Morgan en Columbia, dedujo que los genes se disponían a lo largo de un mapa lineal; los inmediatos en un mismo cromosoma se cotransmitían más a menudo que los pares de genes distantes geográficamente entre sí. La cartografía se convirtió pronto en herramienta poderosa de la genética, aunque la prueba definitiva de la conexión entre mapas de ligamiento y cromosomas llegó en los años treinta, con los estudios de Barbara McClintok sobre cromosomas del maíz.

También a comienzos del siglo XX nace la bioquímica, que aborda el estudio de la vida a través de moléculas orgánicas de extractos *in vitro*. En 1925 quedaría demostrada la reproducción de muchas reacciones celulares en el tubo de ensayo mediante enzimas. La genética, sin embargo, permanecía desconectada del progreso bioquímico. ¿Por qué no indagar la naturaleza de la herencia entre las numerosas especies moleculares que se iban arrancando a la célula? Un par de años después, Hermann Muller inducía con rayos X mutaciones en los genes de *Drosophila*. Los genes eran, en efecto, entidades físicas susceptibles de alteración; además, los genéticos no dependerían en



Laboratorio de Hershey en 1952. Martha Chase y Alfred Hershey son la segunda y el tercero empezando por la izquierda

adelante de la aleatoriedad espontánea de la naturaleza para obtener variantes. Resultaba, pues, imperioso descubrir la molécula de marras.

En 1927 Fred Griffith había descubierto la diferencia entre pneumococos virulentos y no virulentos. Los primeros estaban encerrados en una cápsula, de la que carecían los segundos; a los encapsulados los llamó lisos y, rugosos, a los desnudos. Inyectó ratones con una mezcla de bacterias lisas muertas y bacterias vivas rugosas. Dos días después, todos los ratones habían muerto y estaban ahítos de pneumococos virulentos lisos; los virulentos habían transformado los rugosos en lisos. Griffith creyó ver en tamaña transformación una adaptación lamarckista. Oswald Avery, interesado por el tema desde tiempo atrás, rechazó los resultados de Griffith hasta que Henry Dawson los repitió en su laboratorio del Instituto Rockefeller. Pero, ¿cuál sería el principio transformante? Avery no supo intuirlo en 1936 cuando Colin MacLeod observó que la actividad transformante se destruía con la luz ultravioleta, que, ya se conocía entonces, atacaba los ácidos nucleicos.

En 1937 J. B. S. Haldane creía que el método más plausible de copia génica sería por un proceso análogo al de cristalización. Desechaba la idea de que los genes fueran ácidos nucleicos y ponía su esperanza en las histonas, las proteínas unidas al ADN en los cromosomas. Tres años después, Pauling y Delbrück declaraban que la interacción intermolecular confería estabilidad a dos moléculas de estructura complementaria en yuxtaposición.

En 1944 Avery, McLeod y Maclyn McCarty tenían la respuesta buscada sobre el principio transformante. El ADN extraído de bacterias virulentas bastaba para transferir las instrucciones genéticas de la virulencia. El ataque final había empezado en 1941, con la llegada de McCarty al laboratorio. Parecía muy verosímil que el principio transformante fuera una proteína, degradable por las enzimas que digieren proteínas. Pero tales enzimas (tripsina y quimotripsina) dejaban intacta la actividad transformante. Se descartaba la proteína. ¿Un ARN, quizá? Moses Kunitz acababa de cristalizar una ribonucleasa, enzima que rompe la cadena de ARN, y ofreció a Avery algunos de sus cristales. La ribonucleasa tampoco alteraba la actividad transformante. Lo mismo sucedía con las enzimas que degradaban polisacáridos. McCarty logró por fin un precipitado viscoso de fibras blancas que se teñía de la manera del ADN. ¿Se destruiría la actividad transformante con una desoxirribonucleasa? Así era, observó McCarty. La enzima que degrada el ADN arruinaba la actividad transformante.

Avery y McCarty sumaron prueba tras prueba para convencerse de su descubrimiento, que, por ser tan revolucionario, no se atrevieron a publicar en seguida. Se suponía que los ácidos nucleicos eran moléculas anodinas compuestas de cuatro nucleótidos, puro andamiaje de los cromosomas. Las proteínas, por contra, presentaban una estructura y una bioquímica más complejas, con mayores posibilidades para albergar la información genética. Unos nuevos resultados disiparían las dudas de los más escépticos. En 1952 Alfred Hershey y Martha Chase demostraron que, cuando los virus inyectaban su información genética en las células huésped, el ADN penetraba en la célula, mientras que la cápside proteica permanecía en el exterior (*Illuminating Life. Selected Papers from Cold Spring Harbor*).

Cold Spring Harbor compendia el curso seguido por la teoría de la herencia. Empezó con la genética vegetal. Max Delbrück y Salvador Luria inspiraron la transición de los organismos pluricelulares a la genética microbiana. En sus laboratorios se realizaron los trabajos pioneros sobre reparación del ADN (Witkin), sobre el fago (Hershey) y sobre cromosomas (Cairns).

La dedicación a la genética vegetal arranca con el desarrollo del maíz híbrido por Georges Shull. Conocedor de la biometría de Galton y Pearson, se vale de los métodos de autofecundación y de fecundación cruzada. Descubrió que la variación de los caracteres de las líneas de plantas autofecundadas decrecía; se producía una pérdida de vigor en las líneas puras. Sugería que, si bien a corto plazo una reproducción endogámica selectiva resultaba idónea para

eliminar "componentes inferiores", la selección prolongada conducía a la pérdida de líneas puras. Las plantas de las líneas puras podían revigorizarse con la reproducción cruzada. En ese vigor de los híbridos, o heterosis, debía apuntalarse cualquier estrategia de mejora vegetal. Y se apuntaló.

A principios de los cuarenta Barbara McClintock publica sus observaciones minuciosas sobre la fusión de los extremos rotos de los cromosomas, donde pone de manifiesto el carácter peculiar de esa región que presagia el interés recabado por los telómeros 40 años más tarde. En 1951 recapitula sus resultados sobre los genes móviles, elementos que saltaban de un lugar a otro del genoma del maíz, y establece su famoso ciclo de ruptura (por radiación)-fusión-puente.



Barbara McClintock y Harriet Creighton en un simposio de 1956 sobre "Mecanismos genéticos: estructura y función"

El hallazgo de Hershey nos remite al papel determinante de la virología en el progreso de la genética (*Tobacco Mosaic Virus. One Hundred Years of Contributions to Virology*). Se asocia el nacimiento de la disciplina al artículo de Martinus Beijerinck sobre experimentos con plantas de tabaco infectadas con el virus del mosaico del tabaco (TMV). El estudio mediante difracción de rayos X lo inició John Desmond Bernal en Cambridge antes de la segunda guerra mundial. Dirigía éste el departamento de cristalografía del laboratorio Cavendish y había descubierto que las proteínas cristalizadas ofrecían pautas de difracción de rayos X que se extienden a intervalos del orden de distancias interatómicas. El estudio cristalográfico del TMV lo retomó en 1952 James D. Watson, para demostrar que la disposición de las subunidades de proteína de la partícula vírica era helicoidal. En 1953, Rosalind Franklin determinó los parámetros de esa geometría helicoidal; al abordar la estructura interna de la partícula vírica por difracción de rayos X recurrió al método de sustitución isomorfa.

Contemporáneamente se daba brillante respuesta a otra pregunta crucial. ¿De qué modo podía una molécula almacenar las instrucciones de la herencia? La cuestión había inquietado a los físicos, con Niels Bohr y su alumno Delbrück a la cabeza. Intuían que la estabilidad a largo plazo de los genes podría ser la de moléculas residentes en profundos pozos de potencial. Sospechaban que habría que idear nuevas leyes de la física para explicar la vida. Quien más se involucró fue Erwin Schrödinger en su opúsculo *¿Qué es la vida?*, aparecido en 1945. Schrödinger proponía que los genes tenían que ser cristales aperiódicos constituidos por un número pequeño de elementos isoméricos cuya secuencia precisa constituía el código hereditario a la manera del Morse. Aunque no identificaba las estructuras moleculares responsables, la exposición atrajo, entre varios, a Watson.

La primera puerta a la que éste llamó en Cambridge fue la de Max Perutz (*I wish I'd made you angry earlier*), premio Nobel de química en 1972 con John Kendrew por haber resuelto la estructura de las proteínas. Había venido Perutz de su Viena natal en 1936, empeñado en "resolver el problema de la vida". A su pregunta sobre el modo, Bernal le contestó que "el secreto de la vida se esconde en la estructura de las proteínas y la cristalografía de rayos X es la única manera de descifrarlo". Aprendió la materia y empezó a trabajar en la estructura de la hemoglobina.

En resolverla tardó 20 años. La hemoglobina es una proteína que transporta oxígeno de los pulmones a los tejidos y facilita el retorno de dióxido de carbono de los tejidos a los pulmones. Consta de cuatro cadenas polipeptídicas, dos cadenas alfa de 141 restos aminoacídicos cada una y dos cadenas beta de 146 restos aminoacídicos cada una. Las cadenas alfa y beta tienen diferentes secuencias de aminoácidos, pero se pliegan para formar similares estructuras dimensionales. Cada cadena aloja un grupo hemo, que otorga a la sangre su color rojo.

Watson y Crick descubrían en 1953 la estructura en doble hélice del ADN. Como había predicho Schrödinger, el ADN era un cristal aperiódico, compuesto de cuatro bases nucleotídicas a lo largo de sus hebras. La doble hélice, por apareamiento de A con T y G con C en hileras opuestas, explicaba el mecanismo de copia de la información genética (la complementariedad de los nucleótidos significaba que una cadena podía servir de molde para la formación de una doble hélice) y el de la aparición de las mutaciones (por copia errónea). De un solo golpe, Watson y Crick habían cortado el nudo de la genética.

Impelido por el éxito de la estructura en doble hélice del ADN, Crick propuso en 1954 esa misma geometría para el colágeno. Mas el desciframiento real de tal proteína sería mérito de otro cristalógrafo doctorado en Cambridge, Gopalasamudram Narayana Ramachandran (*Ramachandran. A Biography of the Famous Indian Biophysicist*). Tras doctorarse en su India natal marchó a Inglaterra para un segundo doctorado con William Lawrence Bragg, quien había descubierto los principios de difracción de los rayos X y se aprestaba, con Perutz y Kendrew, a emprender el análisis por rayos X de la estructura de las macromoléculas. Al final se integró en el equipo de Wooster.

Tras prepararse en el Colegio de San José en Trichy, marchó en 1942 al Instituto Indio de Ciencias para trabajar con C. V. Raman, descubridor del efecto que lleva su nombre sobre dispersión de la luz. "Raman sabía que yo comprendía los principios de la óptica. Me puso un primer problema importante. Estudiar la

luz dispersada por diversos planos separados 4, 5, 6… 10 milímetros, y así sucesivamente. Se trataba en realidad de la difracción de Bragg. Estudiar la reflexión de un plano, reflejada por el plano siguiente, etcétera, problema conocido como reflexiones múltiples, abordado ya por Raleigh-Jeans.” Durante su estancia en Cambridge conoció a Linus Pauling.

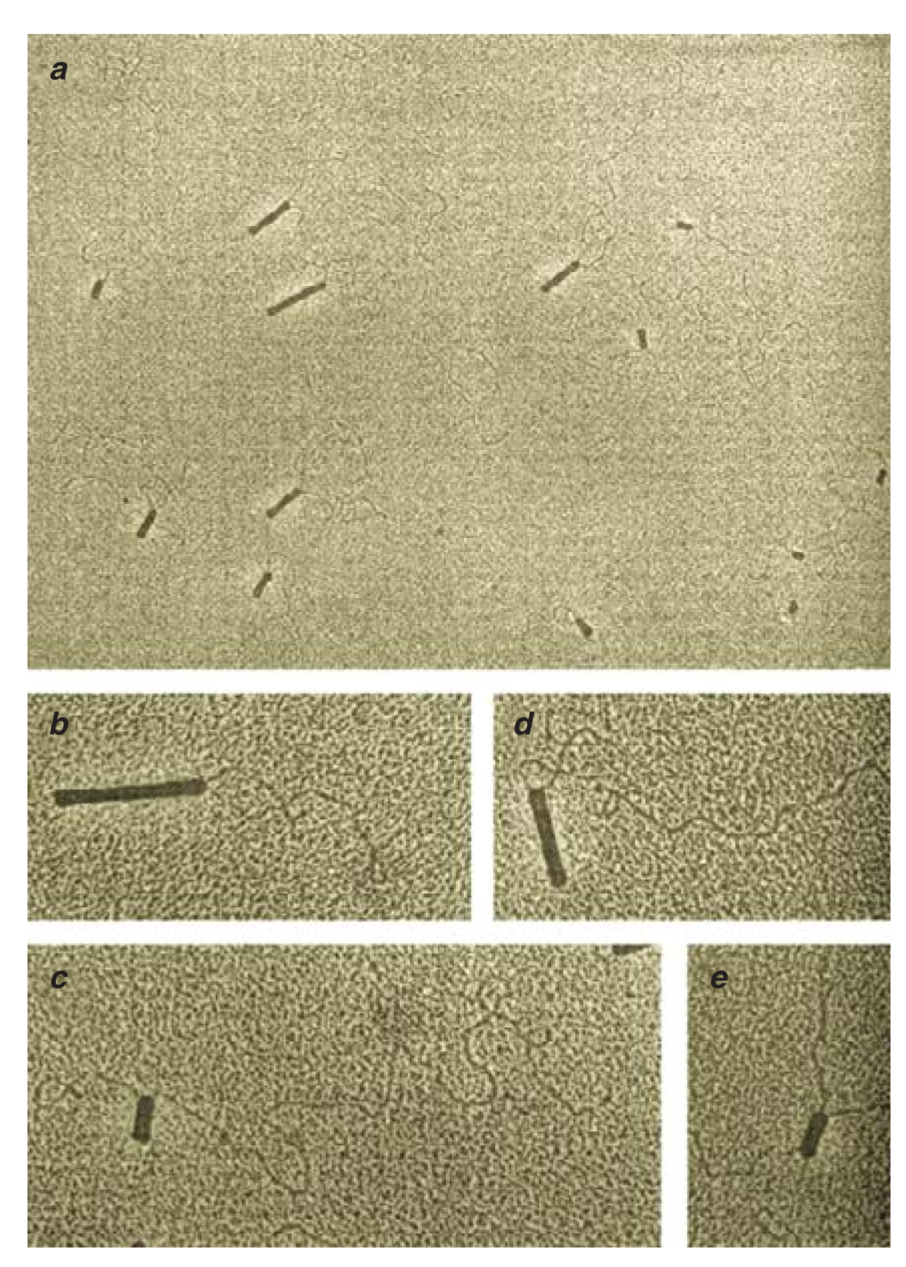
La verdad es que el punto de corte en el campo de la estructura molecular de los biopolímeros se había producido en 1951 con la propuesta de Pauling sobre la hélice alfa. Esta no tenía un número entero de restos por vuelta. Un año después, Cochran, Crick y Vand publicaron un sólido artículo sobre la transformada de Fourier de las estructuras helicoidales. “Estoy absolutamente convencido, cuenta Ramachandran, de que fue esta confianza en los principios químicos, más que las exigencias cristalográficas, lo que removió el obstáculo de un múltiplo de seis como número necesario de unidades por vuelta en la hélice de ADN que resolvieron Watson y Crick. Valdría la pena saber qué sintieron entonces los cristalógrafos. A Bragg, Kendrew y Perutz se les escapó el descubrimiento de la hélice alfa en su estudio exhaustivo de 1950 debido al énfasis que ponían en las configuraciones que eran coherentes con la simetría cristalina.”

Ramachandran realizaría aportaciones sobresalientes al estudio de las estructuras de las proteínas. Su formulación de las leyes para describir las conformaciones de polipéptidos, polisacáridos y polinucleótidos han cristalizado en los manuales y los alumnos de bioquímica están familiarizados con su diagrama phi-psi de las estructuras de las proteínas. Quienes más influyeron en su trayectoria, decía, fueron Pauling, Raman y Bragg. Pero no los únicos. La visita al subcontinente de Bernal en 1952 le orientaría hacia el colágeno. En dos años de trabajo dio con la estructura molecular en un modelo revolucionario: propuso un modelo de triple hélice. El colágeno es una de las proteínas fibrosas de los mamíferos más abundante. Es un componente principal del hueso, tendón, cartílago y dientes.

Un año después, en 1955, Heinz Fraenkel-Conrat y Robley Williams publicaban en los *Proceedings of the National Academy of Sciences*, un artículo que sería piedra angular no sólo de la historia de la virología, sino también del desarrollo de la biología molecular. Mostraban el primer ejemplo en el que una entidad biológica relativamente compleja (el virus del mosaico del tabaco) se autoensamblaba a partir de sus componentes en un medio extracelular. Marcó además el camino para el estudio del reconocimiento proteína-ácido nucleico.

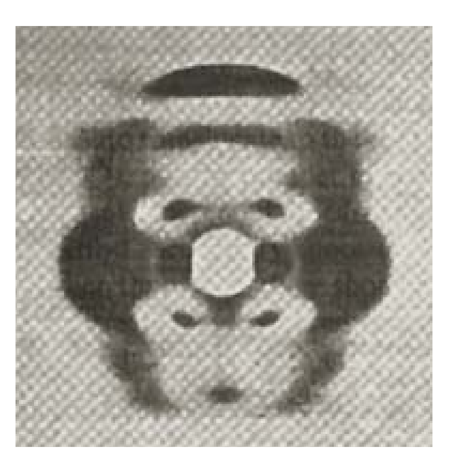
Se sabía ya que las partículas de TMV constaban de unas dos mil subunidades de proteína idénticas, dispuestas con simetría helicoidal, con ARN vírico en el núcleo de las partículas. Se había demostrado también que era posible disociar el virus bajo condiciones alcalinas, permitiendo aislar las subunidades de proteína de la cápside. La secuencia de aminoácidos de la proteína de la cápside del virus del mosaico del tabaco, terminada en 1960, sirvió de piedra de la Rosetta para establecer la correlación entre aminoácidos de la cubierta vírica y tripletes nucleotídicos de su ARN nuclear. Marshall Nirenberg emplearía ARN sintético para descerrajar el código genético: tripletes de bases constituyen “palabras” genéticas que especifican un aminoácido particular.

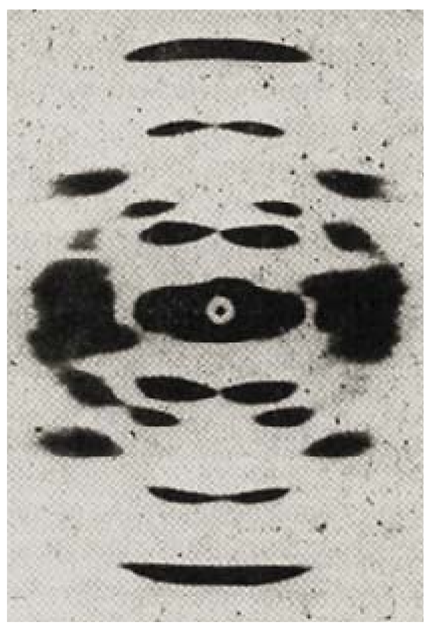
Instrucciones, texto, transcripción, traducción, copia, lectura, palabras. La genética se adaptó, como la mano al guante, a la teoría de la información (*Who Wrote the Book of Life?*



Micrografías electrónicas de partículas del virus del mosaico del tabaco en proceso de reconstrucción

A History of the Genetic Code). Kay sitúa el desarrollo de la genética molecular en el marco de cibernética, la teoría de la información y los computadores. O Norbert Wiener, Claude Shanon y John von Neumann. El proceso de síntesis de proteínas determinado por el ADN se transforma, vía metáfora, en un código de información y una técnica de escritura; en el libro de la vida. No suele advertirse que, en realidad, son metáforas; analogías, no ontologías. Hablando en puridad, ni el código genético es un código, ni el ADN es un lenguaje, ni el genoma un sistema de información. Sin duda, la intuición de Schrödinger de que el lenguaje de la herencia estaba escrito en cifra, al modo del lenguaje Morse, tuvo mucho que ver en el nuevo rumbo de la historia de la biología.





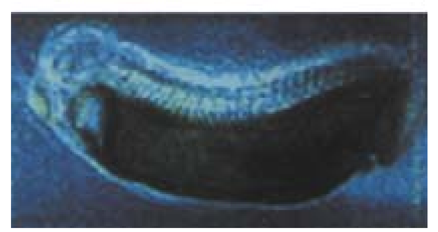
Difracción de rayos X (arriba) *y óptica* (abajo) *que muestran la estructura en triple hélice del colágeno*

Desde finales del siglo XIX, el término cardinal venía siendo el de especificidad, química o biológica. En muy poco tiempo, pasó a un segundo plano de sinonimia, sustituido por el concepto de información. Fue ese un cambio más profundo que el de la primacía concedida al ADN pese a la idea enraizada de la relevancia indiscutida de la proteína. Abramos por donde abramos, resulta inverosímil no leer que los genes transfieren siempre información o que haya otras formas de conocer y hacer. Algunos biólogos teóricos han llamado incluso a la puerta de la gramática generativa en busca de claves para describir la organización genómica y la regulación de la expresión. Sin embargo, desde una óptica lingüística, el código genético no es un código, sino lisa y llanamente una tabla de correlaciones, y ni siquiera tan sistemática o predictiva como la tabla periódica.

A la postre, la "información" es una metáfora de una metáfora y, por tanto, un significante sin un referente, una *catacresis*. Encontramos metáforas en todos los rincones de la ciencia, pero no todas se crean igual. Algunas, como las metáforas de la información y el código genético, poseen una potencia extraordinaria merced a la riqueza de su simbolismo, a su vinculación sincrónica y diacrónica y a su fuerza científica. En el subconsciente cuando menos, "información", "lenguaje", "código", "mensaje" y "texto", analogías *stricto sensu*, se hipostasían.

La genética avanza. En el decenio de los setenta no se podían leer todavía secuencias naturales de ADN, ni siquiera la secuencia de un solo gen. Problema que terminó por resolverse en los setenta mediante las dos técnicas del ADN recombinante: la clonación y la secuenciación. Gracias a ellas se hace más fácil el desarrollo de la genética de poblaciones, uno de cuyos apartados centrales es el estudio de la variabilidad de las secuencias (*Evolutionary Genetics. From Molecules to Morphology*). A ello se ha afanado intensamente Richard Lewontin, en cuyo homenaje se cubren en ese libro todos los aspectos nucleares de la disciplina, desde los fundamentos matemáticos y moleculares de la genética de poblaciones hasta el comportamiento y ecología, pasando por la variabilidad molecular y evolución, selección y polimorfismos genéticos, ligamiento y evolución de los sistemas de cruzamiento, genética cuantitativa y evolución fenotípica, flujo génico y estructura de las poblaciones, y especiación. La amenaza contra la variabilidad, cumplida, se llama extinción (*Genetics and Extinction of Species*).





Brillo emitido por un embrión de rana cuando se activa cierto gen

Lewontin culmina la línea de investigación sobre variabilidad genética de la escuela de Chetverikov-Dobzhansky, centrada en la cuantía y valor adaptativo de dicha variabilidad. La culmina, de entrada, llevando los cálculos, hasta entonces indirectos, cuando no inadecuados, al terreno génico. Aplica la electroforesis de proteínas a la variabilidad genética y, de ese modo, obtiene una estimación directa. Con dicha técnica, además, eliminaba las limitaciones impuestas por la incompatibilidad genética entre especies y permitía comparaciones fiables de variabilidad entre poblaciones sin necesidad de recurrir a cruzamientos. Como él dirá, veinte años de análisis electroforéticos y 15 de secuenciación de ADN y análisis de restricción evidencian que existe una cantidad inmensa de variabilidad genética en las poblaciones, aunque se da una gran diferencia entre especies y entre regiones génicas.

En las pautas de la variabilidad intra e interpoblacionales han de apoyarse los ecólogos si quieren acertar en los grupos que realmente corren un peligro, ellos y el ecosistema entero, trátese de plantas o de animales. Uno de los criterios principales que se propone para obtener ese fin es el del parentesco medio, que permite conservar la diversidad genética concediendo prioridad máxima a los organismos que comparten menos vínculos dentro de una misma población.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES, por Chris Llewellyn Smith

Se trata de un acelerador de partículas dotado de una energía y de una complejidad que no tienen precedentes. El descubrimiento de estratos inéditos de la realidad, que constituye su destino fundamental, requiere la colaboración de personas e instituciones de todo el mundo.

INSTRUMENTOS MUSICALES DE VIDRIO, por Jean-Claude Chapuis

Cuando se hace vibrar una lámina de vidrio se obtiene un timbre específico, "cristalino", que ha interesado a muchos compositores. La poca potencia y la fragilidad de los instrumentos de vidrio les ha privado de un puesto habitual en las orquestas.

BUSQUEDA DE INTELIGENCIA EXTRATERRESTRE

¿DONDE PUEDE ESTAR?, por Ian Crawford

A pesar de todos los esfuerzos realizados y de todos los argumentos que los hacen verosímiles, es posible que la Vía Láctea no albergue a otros seres parecidos a los humanos.

¿DONDE PODRIA ESCONDERSE?, por Andrew J. LePage

Culturas poco desarrolladas pudieran haber escapado a las exploraciones realizadas hasta ahora.

COMUNICACION INTRAGALACTICA, por George W. Swenson, Jr.

No conviene perder de vista las dificultades que la inmensidad del espacio cósmico y sus avatares plantean a todo tipo de comunicaciones interestelares.

LA INFLUENCIA DE DARWIN SOBRE EL PENSAMIENTO MODERNO, por Ernst Mayr

Los grandes pensadores han forjado los moldes ideológicos de los distintos períodos históricos. Lutero y Calvino inspiraron la Reforma; Locke, Leibniz, Voltaire y Rousseau, la Ilustración. El pensamiento moderno refleja en gran medida las influencias de Charles Darwin.

GEOTECTONICA DE LOS PIRINEOS, por Antonio Teixell

La colisión de las placas Ibérica y Eurasiática cerró un mar del que, hace 80 millones de años, surgieron los montes Pirineos. La cordillera actual se sostiene por una profunda raíz cortical que se adentra en el manto terrestre.

LA INDUSTRIALIZACION DEL GENOMA HUMANO

EL ACTUAL NEGOCIO DEL GENOMA HUMANO, por Kathryn Brown

Las empresas que han participado en el desciframiento del código genético humano han realizado un esfuerzo titánico. Ahora viene la parte más satisfactoria.

LA FIEBRE DE LA BIOINFORMATICA, por Ken Howard

La transformación en conocimientos útiles de los datos en bruto del genoma ya constituye un sector industrial pujante.

MAS ALLA DEL GENOMA HUMANO, por Carol Ezzell

Ya se ha catalogado la totalidad del ADN que especifica a un ser humano. Lo que ha de hacerse ahora es sacar consecuencias provechosas de estos datos. Un nuevo sector de estudio, denominado proteómica, pudiera realizar las primeras aportaciones.